

Untersuchungen von nicht-destruktiven Verfahren  
zur Messung von  
Kohlenstoffakkumulation in Pflanzen:  
Sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz und  
Eddy-Kovarianz

Masterarbeit

im Ein-Fach-Masterstudiengang Geographie

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

Vorgelegt von

*Peter Carsten Busch*  
(Matrikelnummer: 7332937)

Erstgutachter: Prof. Dr. Georg Bareth

Zweitgutachter: Prof. Dr. Uwe Rascher

Köln, im Dezember 2019



## I. Danksagung

Hiermit möchte ich mich herzlichst bei Prof. Dr. Uwe Rascher für die Möglichkeit, meine Abschlussarbeit am Forschungszentrum Jülich durchführen zu dürfen, bedanken. Somit konnte ich ein spannendes Themenfeld der sonneninduzierten Chlorophyllfluoreszenz kennenlernen und meine Fähigkeiten im Umgang mit der Programmiersprache Python weiterentwickeln, wofür ich sehr dankbar bin.

Daneben möchte ich mich bei Prof. Dr. Georg Bareth bedanken, der diese Gelegenheit von Anfang an unterstützte und mir durch seine Stellung als Erstgutachter diese Masterarbeit ermöglichte.

Ebenso möchte ich mich bei Vera Krieger bedanken, die mich am Forschungszentrum Jülich direkt betreute. Ich war immer froh mit ihr über thematische und methodische Themen zu reden, sowie über die Mitteilungen, wann morgens nach Jülich aufgebrochen wird. Die zweistündige Fahrerei werde ich sicherlich nicht vermissen.

Auch bei Dr. Marius Schmidt, Dr. Patrizia Ney und Dr. Alexander Graf möchte ich mich für die Daten der Eddy-Kovarianz-Stationen bedanken und die Unterstützung diese zu verstehen.

Neben all diesen Leuten möchte ich mich auch bei Freunden und Kommilitonen bedanken, die ab und zu mit Ratschlägen oder auch mit simplen Ablenkungen dienlich waren.

Zu guter Letzt möchte ich bei meinen Eltern entschuldigen, dass sie mich so lange aushalten mussten, aber das hat jetzt hoffentlich ein Ende. Jetzt beginnt das Berufsleben.

# I. Inhaltsverzeichnis

I.	Danksagung.....	I
II.	Abbildungsverzeichnis .....	IV
III.	Tabellenverzeichnis.....	VII
IV.	Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
V.	Zusammenfassung .....	IX
VI.	Abstract.....	X
1.	Einleitung .....	1
2.	Methodik.....	4
2.1.	Untersuchungsgebiet.....	4
2.2.	Sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz.....	7
2.2.1.	Die Photosynthese .....	7
2.2.2.	Interaktion Photosynthese, sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz und Atmosphäre.....	9
2.2.3.	SIF-Ableitung .....	11
2.2.4.	Datenaufnahme durch HyPlant .....	15
2.2.5.	Vergleichswerte durch FloX-Daten .....	16
2.3.	Schätzung der pflanzlichen Entwicklungsstadien .....	17
2.4.	Eddy-Kovarianz.....	17
2.4.2.	Physikalischer Hintergrund .....	17
2.4.3.	Korrekturverfahren .....	20
2.4.4.	Datenaufnahme .....	22
2.4.5.	Konvertierung von NEE zu GPP .....	23
2.5.	Berechnung der Footprints .....	25
2.6.	Datenanalyse.....	29
3.	Ergebnisse .....	31
3.1.	Ableitung der Chlorophyllfluoreszenz.....	31
3.2.	FloX-Daten.....	45
3.3.	Berechnungen des NDVI .....	47
3.4.	Ableitung der Primärproduktion.....	50
3.5.	Berechnung der Footprints .....	51
3.6.	Windverhältnisse .....	55
3.7.	Zusammenhang zwischen Chlorophyllfluoreszenz und Primärproduktion .....	56
4.	Diskussion .....	61
4.1.	Methodenkritik .....	61

4.2.	Dürrestress .....	62
4.3.	Entwicklungsstadien der Pflanzen .....	62
4.4.	Sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz .....	63
4.5.	Eddy-Kovarianz .....	64
4.6.	Footprints .....	65
4.7.	Zusammenhang zwischen GPP und SIF .....	65
5.	Fazit .....	67
VII.	Literaturverzeichnis .....	68
VIII.	Selbständigkeitserklärung .....	74
IX.	Anhang A .....	75

## II. Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Geographische Lage des Untersuchungsgebiet. Links: Lage innerhalb Mitteleuropas, Mitte: Lage innerhalb der Region, Rechts: Untersuchungsgebiet. .... 4
- Abbildung 2: Flächennutzung innerhalb des Untersuchungsgebietes (nach LUSSEM & HERBRECHT 2019)..... 5
- Abbildung 3: Meteogramm des Jahres 2018 der Station im FZJ im Vergleich zum langjährigen (Lj.) Mittel. Bei der Temperatur stehen die roten Werte für höhere Werte und die blauen Werte für niedrigere Werte im Vgl. zum lj. Mittel. Bei den monatlich akkumulierten Niederschlagsmessungen zeigen die grünen Balken höhere Werte und die orangenen Balken niedrigere Werte im Vgl. zum lj. Mittel (Forschungszentrum Jülich 2019: o.S.). ..... 6
- Abbildung 4: (Oben) Prozess der Photosynthese, wo atmosphärisches CO<sub>2</sub> in Kohlenhydrate umgewandelt werden, (Unten) aneinanderreihende Prozesse zur Umwandlung der Solarenergie in biochemische Energie (ATP & NADPH) (DRUSCH et al. 2016: 1)..... 8
- Abbildung 5: Das komplette Fluoreszenzspektrum (F<sub>tot</sub>), welches durch die beiden Photosysteme PSI und PSII hervorgerufen wird. Beide Photosysteme zeigen zwei Spitzen an, die bei 685 und 740 nm liegen (DRUSCH et al. 2016: 2). ..... 9
- Abbildung 6: Sichtbarer Reflexionsgrad (blau) und echter Reflexionsgrad (rot) innerhalb des SIF-Spektrums. Unterschiede werden durch die Anwesenheit von Wasserstoffabsorptionsbändern oder Fraunhoferlinien, die für Absorption des einfallenden Lichtes sorgen. (Einsatz) Fraunhoferlinien sorgen für geringere Unterschiede als Wasserstoffabsorptionsbänder (ESA 2015: 44)..... 10
- Abbildung 7: Beschreibung der FLD-Methode. (Links: Die solare Bestrahlungsstärke (irradiance) wird durch eine schmale atmosphärische Absorption beeinflusst, Rechts: Die gemessene Strahlung (radiance) zeigt die atmosphärische Absorption mit der anteiligen SIF-Emission) (ALONSO et al. 2008: 620). ..... 12*
- Abbildung 8: Darstellung der Zusammensetzung eines Luftstroms aus mehreren rotierenden Eddys (BURBA & ANDERSON 2010: 16). ..... 18
- Abbildung 9: Darstellung der Funktionsweise der EC-Methode. Links: Eddy 1 bewegt Luftpaket c<sub>1</sub> mit der Geschwindigkeit w<sub>1</sub> hinab. Rechts: Eddy 2 bewegt Luftpaket c<sub>2</sub> mit der Geschwindigkeit w<sub>2</sub> hinauf. Jedes Luftpaket besitzt Eigenschaften über Stoffkonzentrationen, Temperatur oder Luftfeucht. Die Differenz beider Vorgänge beschreibt den Stofffluss (BURBA & ANDERSON 2010: 17) ..... 19

Abbildung 10: Darstellung der Ableitungsergebnisse von $F_{687}$ für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f). .....	34
Abbildung 11: Darstellung der Ableitungsergebnisse von $F_{760}$ für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f). .....	37
Abbildung 12: Darstellung der Ergebnisse der totalen Fluoreszenz ( $F_{tot}$ ) für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f). 40	
Abbildung 13: Darstellung der Ergebnisse für das Verhältnis ( $F_{Ratio}$ ) der Ableitungen $F_{687}$ und $F_{760}$ für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).....	44
Abbildung 14: gefilterte $F_{687}$ -Werte im Tagesverlauf dreier der vier Überflugstage gemessen mit der FloX an der nördlichen Station. Chronologische Reihenfolge: 26. Juni (a), 27. Juni (b) und 29. Juni (c).....	46
Abbildung 15: gefilterte $F_{760}$ -Werte im Tagesverlauf dreier der vier Überflugstage gemessen mit der FloX an der nördlichen Station. Chronologische Reihenfolge: 26. Juni (a), 27. Juni (b) und 29. Juni (c).....	46
Abbildung 16: Darstellung des NDVI für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).....	49
Abbildung 17: Darstellung der Footprints an der nördlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f). 53	
Abbildung 18: Darstellung der Footprints der südlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f). 54	
Abbildung 19: Winddaten der nördlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge (gemessen in 10-minütigen Intervallen). Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f). .....	57
Abbildung 20: Winddaten der südlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge (Gemessen in 10-minütigen Intervallen). Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und	

zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des  
29. Juni und 2. August (f)..... 58

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitpunkte der Überflüge mit dem Sensor HyPlant mit der zugehörigen Flughöhe. ....	16
Tabelle 2: Auswahl nennenswerter Footprintmodelle mit jeweiligen Autoren und zugehörigen Bemerkungen (nach FOKEN 2006a: 86 und FOKEN 2017: 106) .....	26
Tabelle 3: Beispielhafter Aufbau des DataFrame zur Prozessierung der Daten. ....	30
Tabelle 4: Ergebnisse der NEE-Messungen und GPP-Ableitung der nördlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge.....	50
Tabelle 5: Ergebnisse der NEE-Messungen und GPP-Ableitungen der südlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge.....	51
Tabelle 6: Kommutierte Pixelwerte der genutzten Footprints. ....	55
Tabelle 7: R <sup>2</sup> -Werte zwischen SIF-Produkten und GPP für unterschiedliche Sequenzierungen des Footprints (rot: 0 - 0,3; gelb: 0,3 - 0,7; grün: 0,7 - 1) .....	60

## IV. Abkürzungsverzeichnis

CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
cFLD	<i>Corrected Fraunhofer Line Depth</i>
EC	Eddy Kovarianz (engl. <i>Eddy Covariance</i> )
eFLD	<i>Extended Fraunhofer Line Depth</i>
F <sub>687</sub>	SIF bei der Wellenlänge 687 nm
F <sub>760</sub>	SIF bei der Wellenlänge 760 nm
F <sub>Ratio</sub>	Verhältnis der SIF-Ableitungen
F <sub>tot</sub>	Komplette SIF-Emission über das gesamte SIF-Spektrum
FLD	<i>Fraunhofer Line Depth</i>
FOV	<i>Field of view</i>
FZJ	Forschungszentrum Jülich
GPP	Primärproduktion (engl. <i>Gross Primary Production</i> )
iFLD	<i>Improved Fraunhofer Line Depth</i>
NDVI	<i>Normalized Differenced Vegetation Index</i>
NEE	Netto-Ökosystem-Austausch (engl. <i>Net Ecosystem Exchange</i> )
PS I	Photosystem I
PS II	Photosystem II
SFM	<i>Spectral Fitting Method</i>
SIF	Sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz
TR32	<i>Transregional Collaborative Research Centre 32</i>

## V. Zusammenfassung

Der Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Biosphäre wird zu 90% durch die Vegetation vollzogen, sodass kleine Veränderungen in der Vitalität von Pflanzen Verschiebungen in der Gaskonzentration mit sich führen. Die konventionelle Methode den Stofffluss von Kohlenstoffdioxid zwischen Atmosphäre und Biosphäre zu messen ist die der Eddy-Kovarianz (EC), mit der Gasmessungen auf einen Einflussbereich, dem sogenannten Footprint, bestimmt werden. Eine weitere Methode zur Bestimmung des Stoffflusses ist die sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz (SIF), welches ein elektromagnetisches Signal darstellt, das Pflanzen in einem Wellenlängenbereich zwischen 640 und 800 nm emittieren. Dieses Signal steht im Zusammenhang mit der Photosynthese und somit mit der Kohlenstoffakkumulation von Pflanzen. In der folgenden Arbeit wurde eine neue Methode zur Feststellung des Zusammenhangs zwischen SIF und der Primärproduktion (GPP) erprobt. Hierfür wurde der EC-Footprint genutzt, um die GPP- und SIF-Ableitungen räumlich zu gewichten. Die genutzten Footprints wurden anschließend in verschiedene prozentuale Sequenzen eingeteilt. Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Korrelation zwischen SIF und GPP in Abhängigkeit unterschiedlicher Nutzungsanteile am EC-Footprint.

Anhand von Hyperspektralaufnahmen, die mithilfe des HyPlant-Sensors an vier Tagen im Sommer 2018 erstellt wurden, kann SIF in den zwei Wasserstoffabsorptionsbändern bei 678 und 760 nm abgeleitet werden. Zudem kommen zwei SIF-Produkte hinzu:  $F_{\text{Ratio}}$  beschreibt das Verhältnis zwischen  $F_{687}$  und  $F_{760}$ .  $F_{\text{tot}}$ , gibt die totale Fluoreszenz an, was das komplette Emissionsintegral wiederspiegelt. GPP wurde an zwei Station anhand des gemessenen Netto-Ökosystem-Austausches (NEE) mit der Methode nach REICHSTEIN et al. (2005) abgeleitet und die dazugehörigen Footprints wurden anhand der Methode nach KORMANN & MEIXNER (2001) bestimmt. Anschließend wurden mit Python ein Skript geschrieben, welches zuerst die Daten einander räumlich angepasst, dann die Daten ausgelesen und schließlich für die einzelnen Sequenzen pro Überflug einen Wert für SIF und GPP ausgegeben hat. Hiermit wurde anschließend das Bestimmtheitsmaß pro Sequenz pro Station pro SIF-Produkt berechnet. Die Ergebnisse zeigen stärkere Korrelationen bei geringeren Nutzungsanteilen an der nördlichen Station, während die südliche Station und beide Stationen zusammen schwache bis gar keine Korrelation anzeigen. Die Ergebnisse sind im Kontext der Feldgröße in Kombination mit größeren Sequenzen, die über die Feldgrenzen hinausreichen, schwierig, da die veränderte Pflanzenkomposition die Ergebnisse verfälschen könnte. Trotzdem zeigen, die Ergebnisse der nördlichen Station eine mögliche Nutzung dieser Methode für zukünftige ausgeweitete Untersuchungen.

## VI. Abstract

Vegetation drives 90 % of the gas exchange between biosphere and atmosphere resulting in the dependency of vital vegetation for stable gas concentrations in the atmosphere. The commonly used method for measuring gas fluxes is eddy covariance (EC), which measures the difference between incoming and outgoing gas and specifies these measurements on a source region called footprint. Another method for quantifying gas fluxes is sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF), which is an electromagnetic signal in a spectral region between 640 and 800 nm emitted by plants during photosynthesis. SIF correlates strongly with the photosynthetic efficiency and therefore with the assimilation of carbon.

In the following thesis a new method for linking SIF with gross primary production (GPP) is postulated. The Method uses the EC-Footprint for spatially weighting SIF and GPP. The used footprints were subsequently divided in different percentages. The aim of this thesis is the analysis of the correlation between SIF and GPP regarding the use of different percentages of the EC footprint.

Hyperspectral scenes were taken with the sensor HyPlant on four days during summer of 2018. With these scenes SIF can be estimated due to the iFLD method which uses two oxygen absorption bands at 678 and 760 nm. Two additional SIF products were considered:  $F_{\text{Ratio}}$  describes the ratio between the estimated  $F_{687}$  and  $F_{760}$ .  $F_{\text{tot}}$  is characterized by the total Fluorescence of the entire emission spectrum. GPP were estimated with the measured net ecosystem exchange (NEE) by the method of REICHSTEIN et al. (2005). The estimation of the footprints was calculated by the method of KORMANN & MEIXNER (2001). A script written in python spatially matched and read the different data sets. Afterwards the script exported values of GPP and SIF for different percentages of the footprint, which were used to calculate the coefficient of determination per percentage per station per SIF product.

The results show a strong correlation with the use of small percentages of the footprint for the northern station, while the southern and both stations combined show no or small correlation in all percentages of the footprint. The extent of the fields could play an important role in the calculations due to the larger extent of the footprints. Higher percentages overlap the fields boundaries and therefore bordering plant species could manipulate the results. However, the results of the northern station show a possible use of the method for future investigations.

# 1. Einleitung

Etwa 90 % des Gasaustausches zwischen Biosphäre und Atmosphäre sind auf Pflanzen zurückzuführen (DAMM ET AL. 2010: 173). Der globale Pflanzenbestand nimmt jährlich etwa 120 t an Kohlenstoff auf, wovon lediglich die Hälfte in der Vegetation akkumuliert wird. Der Rest wird über die pflanzliche Atmung wieder an die Atmosphäre zurückgegeben (JANZEN 2004: 401). Die pflanzliche Primärproduktion (*gross primary production*, GPP) basiert auf der Photosynthese, mit der Pflanzen in der Lage sind Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre in Kohlenstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Ersteres wird genutzt, um vielerlei Eigenschaften der Pflanzen, wie z.B. das Wachstum, zu fördern (ESA 2015: 20). Kleinste Veränderungen in Ökosystemen können wiederum Verschiebungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre hervorrufen (DAMM et al. 2012: 7134), was im Kontext des Klimawandels von besonderem Interesse ist (MUROAKA et al. 2013: 393). Terrestrische Ökosysteme spielen eine wichtige Rolle als Kohlenstoffsinken, da diese jährlich etwa ein Viertel der anthropogenen Kohlenstoffdioxidemissionen aufnehmen (WOHLFAHRT et al. 2018: 1). Somit ist die GPP-Bestimmung von enormer Wichtigkeit für Untersuchungen des Kohlenstoffkreislaufes (WIENEKE 2016: 1).

Zur Quantifizierung der Kohlenstoffakkumulation wird genaues Wissen über die räumlichen und temporalen Dynamiken der Photosynthese benötigt. Die herkömmliche Methode ist die der Eddy-Kovarianz (EC), die anhand von mikrometeorologischen Messungen den CO<sub>2</sub>-Stofffluss quantifizieren und diesen durch ein Quellgebiet, dem sogenannten Footprint, räumlich wiedergeben kann (DAMM et al. 2010: 173). Die Messergebnisse geben jedoch nicht nur die Primärproduktion wieder, sondern auch die Bodenatmung ist hier wiederzufinden, sodass diese beiden Parameter voneinander getrennt werden müssen (REICHSTEIN et al. 2012: 263). Darüber hinaus weist diese Methode eine räumliche Limitation durch die stationäre Messung auf, sodass nur kleinräumige Messungen vorgenommen werden können. Dies wird durch die nötige Nutzung der Footprints deutlich (FOKEN 2006a: 84f).

Eine weitere aktuelle Methode im Bereich der Fernerkundung ist die sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz (SIF), welche optische Eigenschaften der Vegetation nutzt, um auf die photosynthetische Aktivität zu schließen. Erst durch die Strahlung der Sonne, die durch das Chlorophyll in den Blättern der Pflanze absorbiert wird, kann die Pflanze Photosynthese betreiben. Die hierbei erhaltene Energie wird jedoch nicht ausschließlich für die Photosynthese genutzt, sondern teilweise auch als elektromagnetisches Signal abgegeben. Dieser Vorgang nennt sich sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz (DRUSCH et al. 2017: 2). Das Spektrum des fluoreszierten Lichtes nimmt einen Wellenlängenbereich von 640 bis 800 nm ein, was dem sichtbaren roten und dem nahen infraroten Licht entspricht (ESA 2015: 24). Da die

Chlorophyllfluoreszenz im Zusammenhang mit der photosynthetischen Aktivität steht, kann diese ebenso Aufschluss über GPP geben (FRANKENBERG et al. 2011: 4). Die sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz wurde von Sir David Brewster 1843 entdeckt, der Chlorophyll mithilfe von Alkohol extrahiert hat, das unter Sonnenlicht ein rotes Licht erzeugte. MÜLLER (1874) postulierte als erster einen Zusammenhang zwischen SIF und GPP, was von KAUTSKY & HIRSCH (1931) bestätigt wurde. Mitte des 20. Jahrhunderts sorgte die Forschung von DUYESENS & SWEERS (1963) für den Nachweis einer quantitativen Beziehung zwischen SIF und der Rate des Elektronentransports, sodass SIF heutzutage eine etablierte Methode in den Forst- und Agrarwissenschaften sowie der Ökologie darstellt (MOHAMMED et al. 2019: 2). ZHANG et al. (2014) zeigten, dass SIF ein Indikator für die maximale Carboxylierung ist, welche den Prozess der Kohlenstoffakkumulation in den Pflanzen steuert. Hier konnten SIF-Messungen den Umfang und den saisonalen Verlauf der maximalen Carboxylierung widerspiegeln. Ergebnisse von ROSSINI et al. (2016) zeigen, dass unterschiedliche Pflanzentypen jeweils verschiedene SIF-Stärken wiedergeben. So sind die SIF-Emissionen bei Feldfrüchten höher als bei Laub- oder Nadelbäumen.

Das SIF-Signal besitzt jedoch nur eine schwache Ausprägung und muss vom reflektierten Licht entkoppelt werden (MERONI et al. 2009: 2038). Dies passiert auf Grundlage der Fraunhoferlinien oder Sauerstoffabsorptionsbändern, die sich in der solaren bzw. in der Erdatmosphäre befinden, in denen das einfallende Licht bestimmter Wellenlängen im Bereich der SIF-Emission absorbiert wird. So kann durch Messungen innerhalb und außerhalb der Wellenlängenbereiche auf SIF geschlossen werden (CENDRERO-MATEO et al. 2019: 2, HEINTZE 2019: 4). Diese Methode wurde von PLASCYK (1975) und PLASCYK & GABRIEL (1975) entwickelt und wird als FLD (Fraunhofer Line Depth) bezeichnet. Auf Basis dieser Methode wurden weitere Verfahren entwickelt: 3FLD-Methode nach MAIER ET AL. (2003) und die cFLD-Methode (*corrected FLD*) nach GÓMEZ-CHOVA et al. (2006) und MOYA et al. (2006). Diese Verfahren können mithilfe von multispektralen Daten SIF ableiten, während die Methoden der iFLD (*improved FLD*), eFLD (*extended FLD*) und SFM (*Spectral Fitting Method*) Hyperspektraldaten nutzen (MERONI et al. 2009: 2041f).

Zur Messung von SIF werden passive Systeme eingesetzt, welche von der Blattebene bis auf globaler Ebene genutzt werden. Geräte zur Messung von SIF auf Blattebene sind noch rar, während aktive Geräte häufiger zu finden sind. Die FluoWat ist ein portables Spektrometer, das die Messung des kompletten SIF-Spektrums durchführen kann (MOHAMMED et al. 2019: 16f). Die sogenannte FloX ist ein terrestrisches System, das etwa 1 bis 10 m über dem Kronendach installiert wird und kontinuierlich Daten aufnimmt, sodass sowohl Tagesgänge als auch saisonale Veränderungen dargestellt werden können. Ähnliche Geräte sind die FluoSpex 2 und die Piccolo. Letzteres kann ebenso an Drohnen installiert werden (AASEN et al. 2019: 8). Drohnen sind - wie

Flugzeuge und Satelliten - inzwischen in der Lage multi- und hyperspektrale Aufnahmen der Erdoberfläche durchzuführen, sodass diese anhand der unterschiedlichen Ableitungsmethoden im Stande sind SIF zu bestimmen. Flugzeuggestützte Systeme wie APEX (Airborne Prism Experiment) oder HyPlant ermöglichen räumlich und spektral hochaufgelöste Aufnahmen von Hyperspektraldaten, sodass hiermit großräumige SIF-Karten erstellt werden können (MOHAMMED et al. 2019: 17f). GUANTER et al. (2007) zeigten, dass Ableitungen ebenfalls auf globaler Ebene via Satelliten möglich sind. Zurzeit arbeitet die Europäische Raumfahrtagentur (ESA) an einem Satelliten, der speziell zur Messung des SIF-Signals entwickelt wird und somit die photosynthetische Aktivität und Stress quantifizieren kann (ESA 2015: 3). Der Start der FLEX-Mission (FLuorescence EXplorer) ist für das Jahr 2022 geplant (DRUSCH et al. 2017: 1). Somit können bildgebende Sensoren an Drohnen, Flugzeugen oder Satelliten flächendeckende Daten über GPP geben im Gegensatz zur EC-Methode, die von ihrem Footprint abhängig ist (DUVEILLER & CESCATTI 2016: 72).

In dieser Arbeit soll eine neue Methode zur Verifizierung der Korrelation zwischen SIF und GPP erprobt werden. SIF wurde in zwei Sauerstoffabsorptionsbändern abgeleitet ( $F_{687}$  und  $F_{760}$ ), durch die zwei weiteren SIF-Produkte ( $F_{\text{tot}}$  und  $F_{\text{Ratio}}$ ) berechnet werden konnten. GPP wurde durch EC-Messungen im Untersuchungsgebiet Selhausen abgeleitet. Anschließend wurden sowohl die GPP-Ableitungen als auch die unterschiedlichen SIF-Produkte anhand der EC-Footprints räumlich gewichtet und daraufhin in unterschiedliche prozentuale Nutzungsanteile des Footprints gegliedert. Zur Darstellung der Korrelation zwischen den SIF-Produkten und GPP-Ableitungen in Abhängigkeit der Anteile am EC-Footprint wurde jeweils das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) berechnet.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Korrelation zwischen räumlich gewichteten SIF und GPP in Abhängigkeit des Einsatzes unterschiedlicher Nutzungsanteile des EC-Footprints.

## 2. Methodik

### 2.1. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet Selhausen (Abb. 1) gehört zum südlichen Teil der Niederrheinischen Bucht, welche sich im Westen Deutschlands, nahe der belgischen Grenze befindet (SCHMIDT et al. 2012: 115). Genauer wird das Untersuchungsgebiet der naturräumlichen Haupteinheit der Jülicher Börde zugeschrieben (LÖBF 2005:17). Selhausen gehört zum *Transregional Collaborative Research Centre 32* (TR32), das von mehreren unterschiedlichen Arbeitsgruppen der Universitäten Aachen, Bonn und Köln, sowie des Forschungszentrums Jülich (FZJ) unterhalten wird. Das TR32 beinhaltet eine große Vielfalt von interdisziplinären Arbeitsgruppen aus den Themenbereichen der Meteorologie, Geophysik, Boden- und Pflanzenwissenschaften, Hydrologie, Mathematik, Geographie und Geoinformatik, sodass hier viele Messstationen eingerichtet sind, die ein Monitoring der Region für diverse Fragestellungen gewährleisten (CURDT 2014: 3). Innerhalb des Untersuchungsgebietes befinden sich zwei EC-Stationen, die als nördliche Station (SE\_EC\_001) und als südliche Station (SE\_EC\_004) bezeichnet werden.

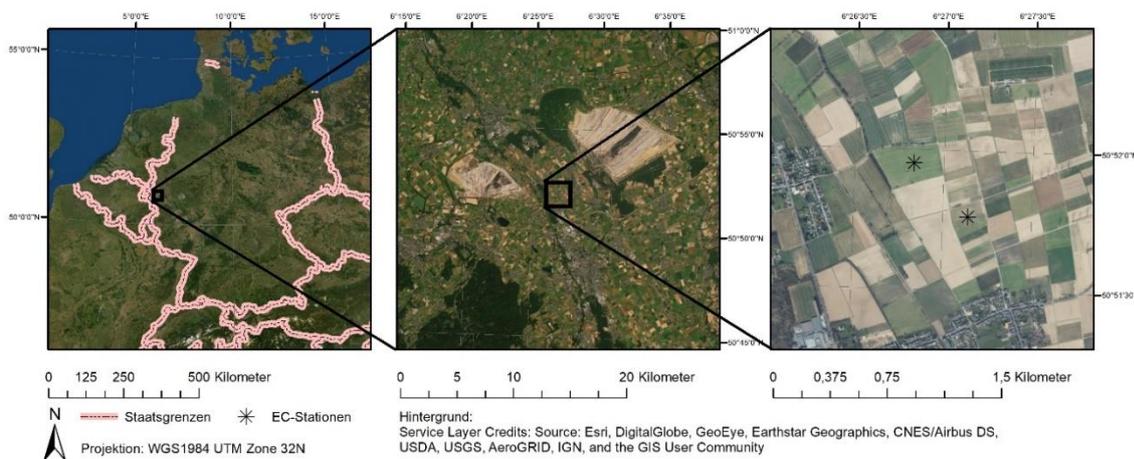


Abbildung 1: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes. Links: Lage innerhalb Mitteleuropas, Mitte: Lage innerhalb der Region, Rechts: Untersuchungsgebiet.

Das FZJ befindet sich nur wenige Kilometer nordwestlich von Selhausen. Das Relief der Region entsprach ursprünglich einer flachen Ebene, welche jedoch durch den Braunkohletagebau zu einer starken Veränderung gezwungen wurde (Vgl. Abb. 1, Mitte). So stellt die Sophienhöhe mit einer Höhe von 302 m über NN den höchsten Punkt der Region dar, welcher 7,5 km nördlich des Untersuchungsgebietes liegt. Zudem liegen zwei Tagebaugruben in 4 km nordöstlicher und in 6 km westlicher Richtung, welche die tiefsten Punkte der Region sind (EDER et al. 2015: 191).

Trotz dieser Einflüsse zeigt das Relief des Untersuchungsgebietes nur ein geringes Gefälle von unter 4° (SCHMIDT et al. 2012: 115).

Der Boden im Untersuchungsgebiet besteht aus quartären Sedimenten, die sich fluvial durch den Rhein, die Maas und die Rur abgelagert haben. Darüber liegt eine Schicht Löss von ca. einem Meter Mächtigkeit. Der Bodentyp ist als Lavisol klassifiziert und die Bodenart besteht aus etwa 16% Ton, 68% Schluff und 15% Sand, was als schluffiger Lehm bezeichnet wird (SCHMIDT et al. 2012: 115). Besonders die mächtige Lössschicht begünstigt landwirtschaftlichen Anbau (MUHS 2007: 1406) der auch im Untersuchungsgebiet dominant ist. Unterschiedliche Feldfrüchte werden hier angebaut: Zuckerrüben, Weizen, Gerste, Raps, Kartoffeln etc. (Vgl. Abb. 2).

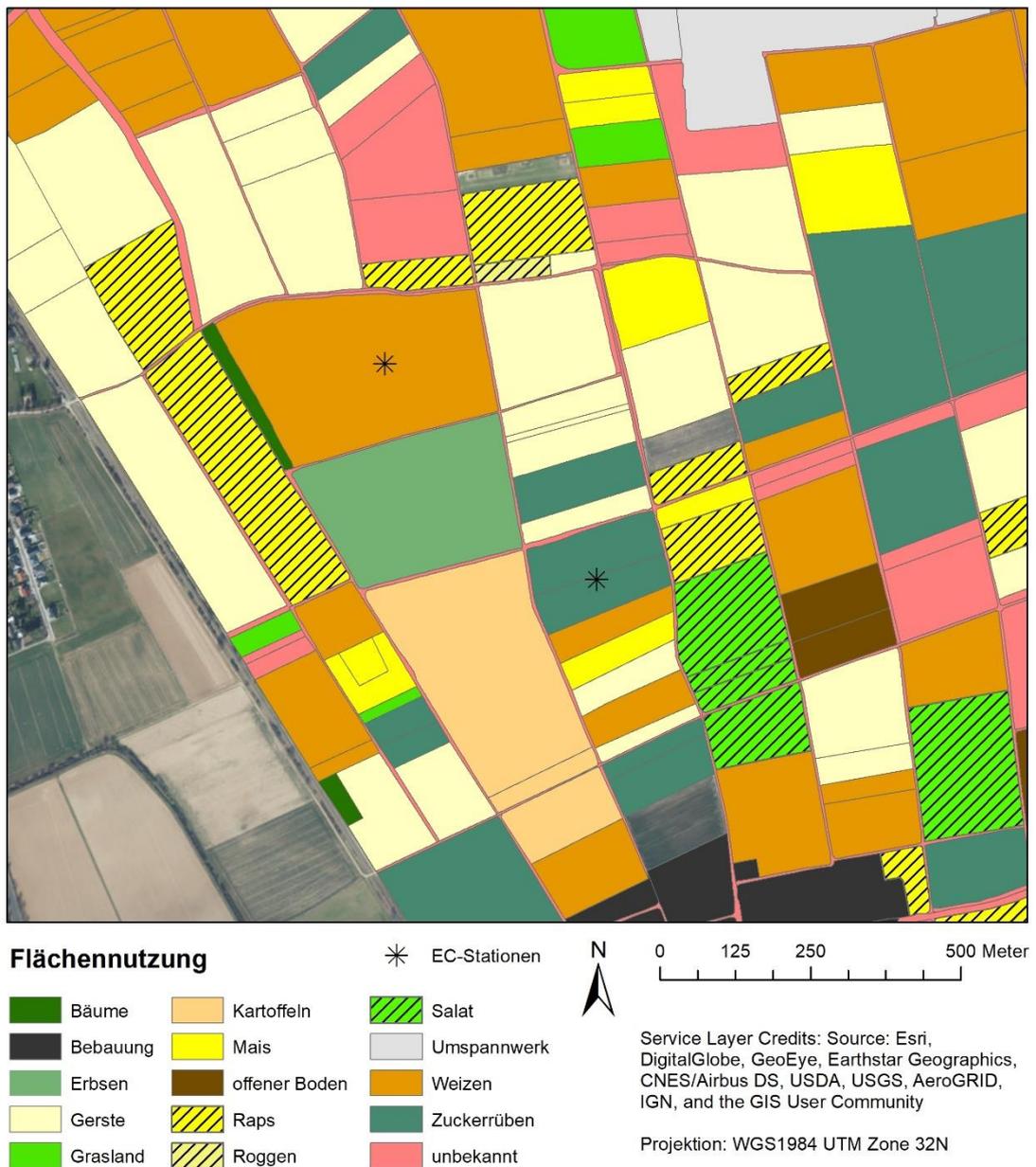


Abbildung 2: Flächennutzung innerhalb des Untersuchungsgebietes (nach LUSSEM & HERBRECHT 2019).

Die Klimastation im FZJ weist eine durchschnittliche Jahresmitteltemperatur von 10,0°C auf, bei einem durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 694 mm im Zeitraum von 1961 bis 2018. Zudem wird eine mittlere Windgeschwindigkeit von 3,1 m/s angegeben. Das Jahr 2018 allein zeigt im Vergleich eine höhere Mitteltemperatur von 11,7°C (Vgl. Abb. 3), die auch für den genannten Zeitraum die höchste je gemessene Mitteltemperatur darstellt, und eine niedrigere Niederschlagsmenge von 480 mm. Die mittlere Windgeschwindigkeit des Jahres 2018 liegt bei 2,4 m/s. (Forschungszentrum Jülich 2019a: o.S.).

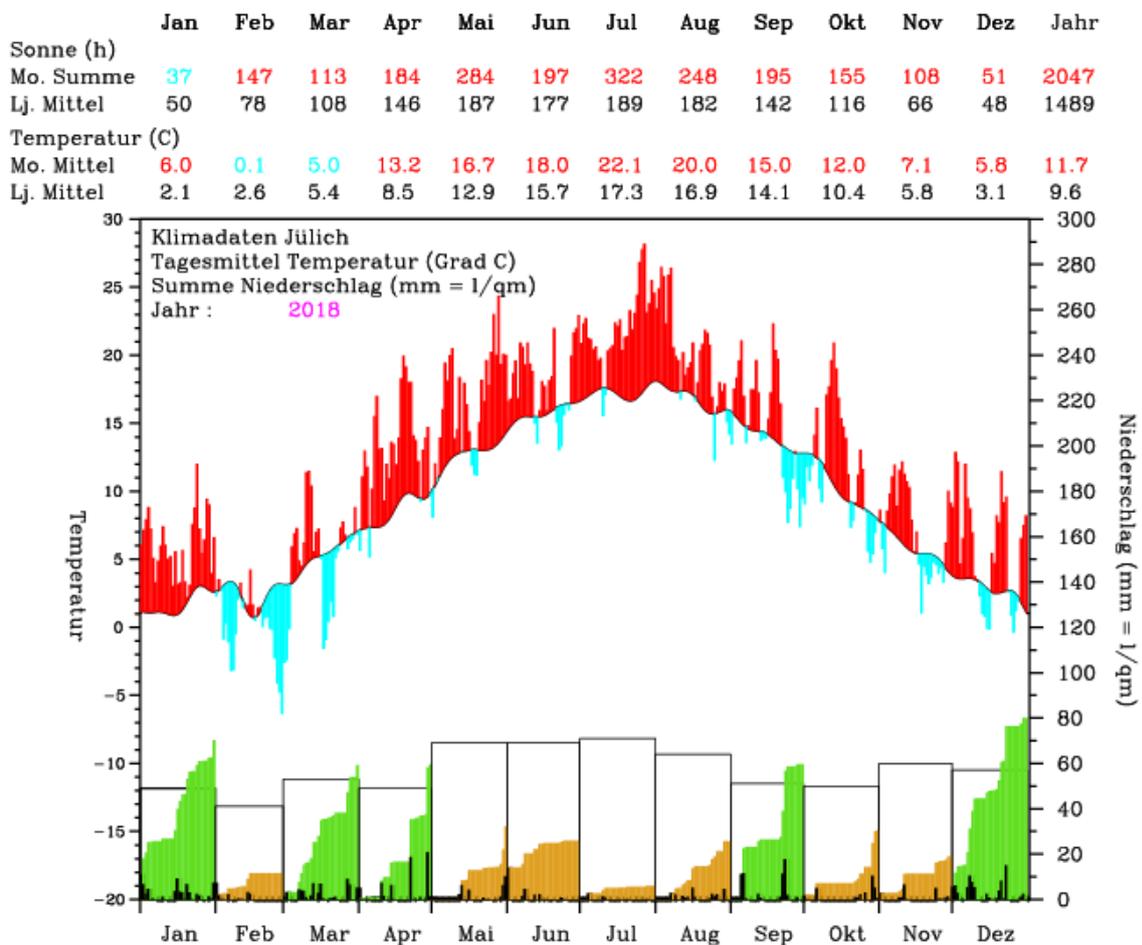


Abbildung 3: Meteogramm des Jahres 2018 der Station im FZJ im Vergleich zum langjährigen (Lj.) Mittel. Bei der Temperatur stehen die roten Werte für höhere Werte und die blauen Werte für niedrigere Werte im Vgl. zum lj. Mittel. Bei den monatlich akkumulierten Niederschlagsmessungen zeigen die grünen Balken höhere Werte und die orangenen Balken niedrigere Werte im Vgl. zum lj. Mittel (Forschungszentrum Jülich 2019: o.S.).

## 2.2. Sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz

Die sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz (SIF) beschreibt ein optisches Signal, das potenziell als direkter und indirekter Indikator für die photosynthetische Effizienz verwendet werden kann. Dieses Fluoreszenzsignal wird innerhalb des zur Photosynthese genutzten Systems der Pflanze emittiert und kann auf Blattebene als auch auf der Ebene des Kronendaches detektiert werden (RASCHER et al. 2015: 4674).

### 2.2.1. Die Photosynthese

Die Photosynthese ist der Prozess, den Pflanzen nutzen, um Sonnenlicht, Wasser, Nährstoffe und Kohlenstoffdioxid in komplexe und energiereiche Kohlenhydrate umzuwandeln. Dieser Prozess ist die Grundlage für das Wachstum und die Produktivität von Pflanzen, womit auch der Austausch von Energie und Masse einhergeht. Da die Photosynthese von vielen Variablen abhängt, kann man anhand der photosynthetischen Produktivität Aufschlüsse über die Dynamiken der Biosphäre erhalten. Die produzierten Kohlenhydrate können in eine große Bandbreite an Eigenschaften umgewandelt werden. So sind die Kohlenhydrate die Grundlage für äußere Strukturen wie bspw. den Stamm eines Baumes oder auch den Duft einer Blume. Auch für weitere Komponenten wie die Produktion von Stärke, Ölen und Proteinen sowie Pigmenten und Vitaminen sind Kohlenhydrate essenziell (ESA 2015:20).

Das Sonnenlicht wird von der Pflanze durch die photosynthetischen Pigmente wie bspw. Chlorophyll oder Carotenoide aufgenommen. Die erhaltene Energie führt zu einer großen Aneinanderreihung mehrerer biophysikalischer und biochemischer Prozesse innerhalb der Chloroplasten, die durch das Photosystem I (PSI) und Photosystem II (PSII) kontrolliert werden. Diese sind in der Lage Energie anzureichern, welche Wassermoleküle spalten kann und den linearen Elektronentransport ermöglicht. Am Ende der Reaktionskette stehen ebenso die beiden biochemischen Produkte NADPH (Nicotinamidadenindinukleotidphosphat) und ATP (Adenosintriphosphat) (Abb. 4) (ESA 2015: 20f), welche direkt zur Aufnahme von Kohlenstoffdioxid genutzt werden (MURCHIE & LAWSON 2013: 3990).

Grundsätzlich kann man Ökosysteme als dynamisch und variabel beschreiben, sodass Pflanzen unterschiedliche Verhältnisse erleben können, welche die photosynthetische Aktivität reduzieren, was letztendlich zu Stress für die Pflanze führt. Dieser Pflanzenstress kann vielerlei Auslöser haben: Die Sonneneinstrahlung kann in der Intensität und den spektralen Eigenschaften variieren. Zu kalte und zu heiße Temperaturen können zu einer Reduzierung der Enzymaktivität führen bzw. zur kompletten Zerstörung der Enzyme und Proteine. Trockenheit

führt zu der Schließung der Stomata, über die Pflanzen  $\text{CO}_2$  aufnehmen, sodass weniger Kohlenstoff gebunden werden kann. Darüber hinaus können toxische Stoffe (z.B. Ozon), Mikroorganismen und Viren als auch herbivore Tierarten den photosynthetischen Prozess negativ beeinflussen. Um dem Pflanzenstress entgegenzuwirken gibt es mehrere physiologische Maßnahmen, die eine einstweilige Kompensation ermöglichen. Darunter fällt die Limitation des Energieflusses zwischen den Pigmenten zum Reaktionspunkt, die Umverteilung der absorbierten Energie zwischen PS I und PS II und eine Veränderung des Elektronenflusses zwischen den linearen und zyklischen Leitungen. Ebenso gibt es Mechanismen innerhalb des PS II, die den Energiefluss des linearen Elektronentransports anpassen. Es sei angemerkt, dass Pflanzen unter anhaltend schlechten Bedingungen dauerhaft Probleme mit der Produktivität und der Vitalität aufweisen (ESA 2015: 22).

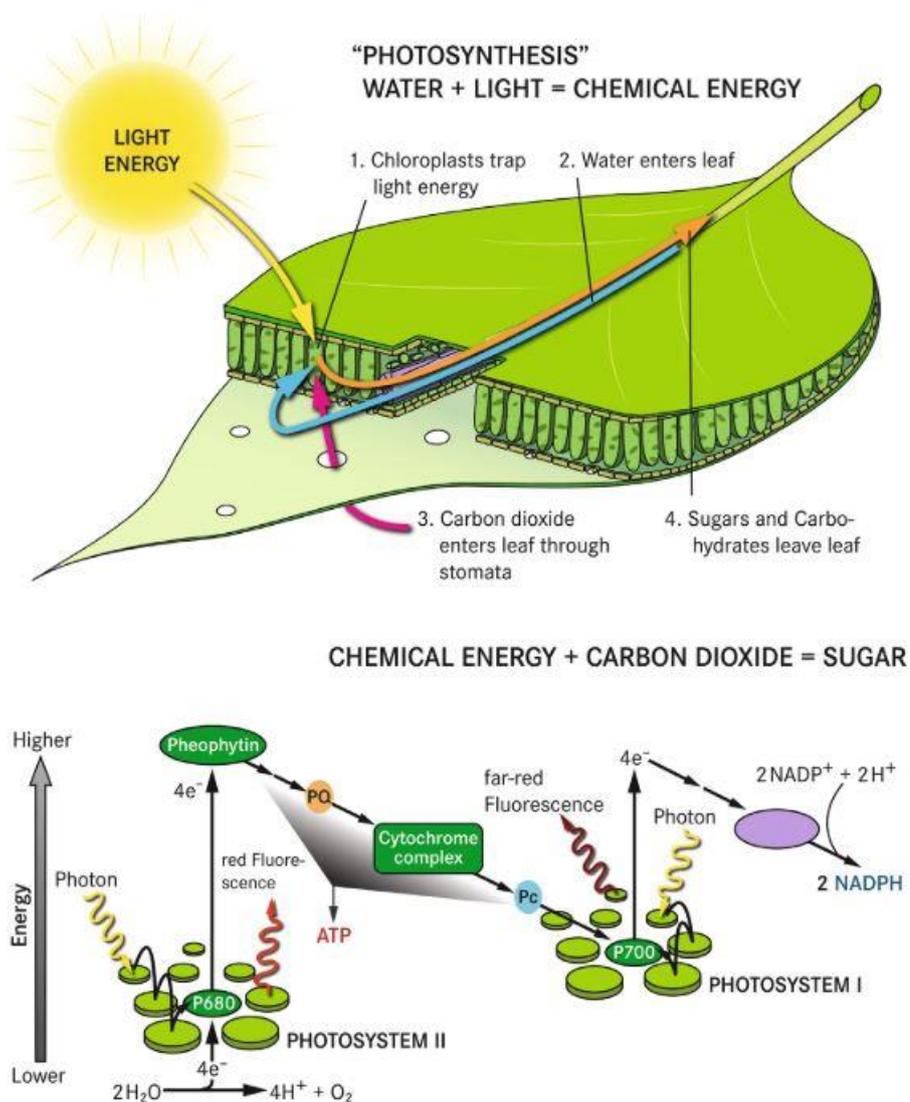


Abbildung 4: (Oben) Prozess der Photosynthese, wo atmosphärisches  $\text{CO}_2$  in Kohlenhydrate umgewandelt werden, (Unten) aneinanderreihende Prozesse zur Umwandlung der Solarenergie in biochemische Energie (ATP & NADPH) (DRUSCH et al. 2016: 1)

## 2.2.2. Interaktion Photosynthese, sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz und Atmosphäre

Sobald Photosynthese betrieben wird, wird ein Teil der durch die Sonne erhaltenen Energie als Wärme und als Lichtsignal emittiert. Dieses elektromagnetische Signal - die sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz - weist eine Bandbreite der Wellenlänge von 640 bis 800 nm auf, was einen Bereich vom sichtbaren roten Licht bis zum nahen Infrarotlicht wiedergibt (ESA 2015: 24). Die beiden Photosysteme PSI und PSII zeigen hierbei unterschiedliche Charakteristika, welche sich auf unterschiedliche Intensitäten entlang dieses Spektrums beziehen (Abb. 5). So zeigt das emittierte Licht von PS II zwei Spitzen bei 685 und 740 nm, während PS I nur ein Maximum bei etwa 740 nm aufweist. Die Intensität der Strahlung, die von PS II emittiert wird, ist im Normalfall ausgeprägter als die von PS I. Da die beiden Photosysteme in einer Reaktionskette verfahren, wird das SIF-Signal in den beiden Spitzen gemessen (Vgl. Abb. 4) (DRUSCH et al. 2016: 1; CENDRERO-MATEO et al. 2019: 2).

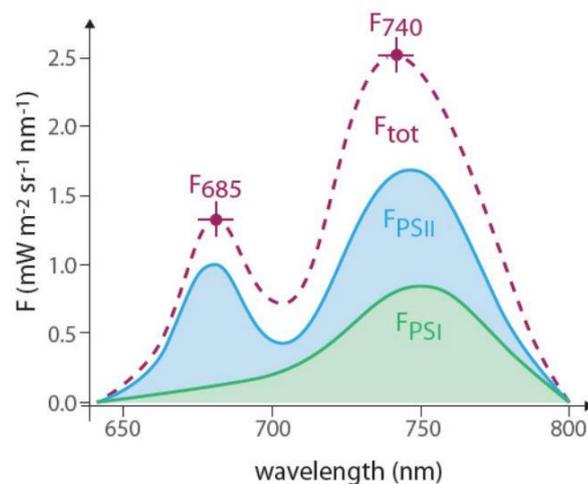


Abbildung 5: Das komplette Fluoreszenzspektrum ( $F_{tot}$ ), welches durch die beiden Photosysteme PSI und PSII hervorgerufen wird. Beide Photosysteme zeigen zwei Spitzen an, die bei 685 und 740 nm liegen (DRUSCH et al. 2016: 2).

Die Intensität des fluoreszierten Lichtes ist jedoch im Vergleich zu der Strahlung, die von Pflanzen in diesem Wellenlängenbereich reflektiert wird, sehr gering, sodass sich die Detektion von SIF schwierig gestaltet. So macht laut CAMPBELL et al. (2008) bei einer Wellenlänge von 685 nm SIF einen Anteil von 10-25 % aus, während bei 740 nm dieser Anteil auf 2-6 % abfällt. Um das Fluoreszenzsignal ableiten zu können, muss man die Absorptionseigenschaften der Sonnen- und der Erdatmosphäre betrachten, da durch die Absorption der Einstrahlung das Verhältnis von SIF zur reflektierten Strahlung zunimmt. Somit sind Fraunhoferlinien und Absorptionsbänder ein essenzieller Bestandteil bei der Ableitung von SIF (CENDRERO-MATEO et al. 2019: 2ff). Fraunhoferlinien sind Wellenlängenbereiche, in denen schon innerhalb der Sonnenatmosphäre Absorption der elektromagnetischen Strahlung der Sonne hervorgerufen

wird. Dieser Prozess ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung der solaren Atmosphäre (HEINTZE 2019: 4). So verursachen Eisen (Fe) und Kaliumiodid (KI) in den Wellenlängen 758,8 nm und 770,1 nm stärkere Absorption (CENDRERO-MATEO et al. 2019: 2). Ebenso funktionieren die Absorptionsbänder, die sich innerhalb der Erdatmosphäre befinden. Hier sind es die atmosphärischen Stoffe, die bei bestimmten Wellenlängen die Strahlung absorbieren. In der Erdatmosphäre sind drei Absorptionsbänder vorhanden, die im Bereich des roten und nahen infraroten Lichtes liegen (Abb. 6): Bei 656,3 nm befindet sich die  $H\alpha$ -Linie, die durch Wasserstoff hervorgerufen wird. Zudem sorgt Sauerstoff für zwei Absorptionsbänder bei 687 und 760 nm. Besonders die letzten beiden eignen sich für die SIF-Ableitung, da diese mit den Spitzen der Intensitätskurve von SIF übereinstimmen und die Breite dieser Bänder die Messungen aus der Luft als auch aus dem All ermöglichen (RASCHER et al. 2009: 1182f).

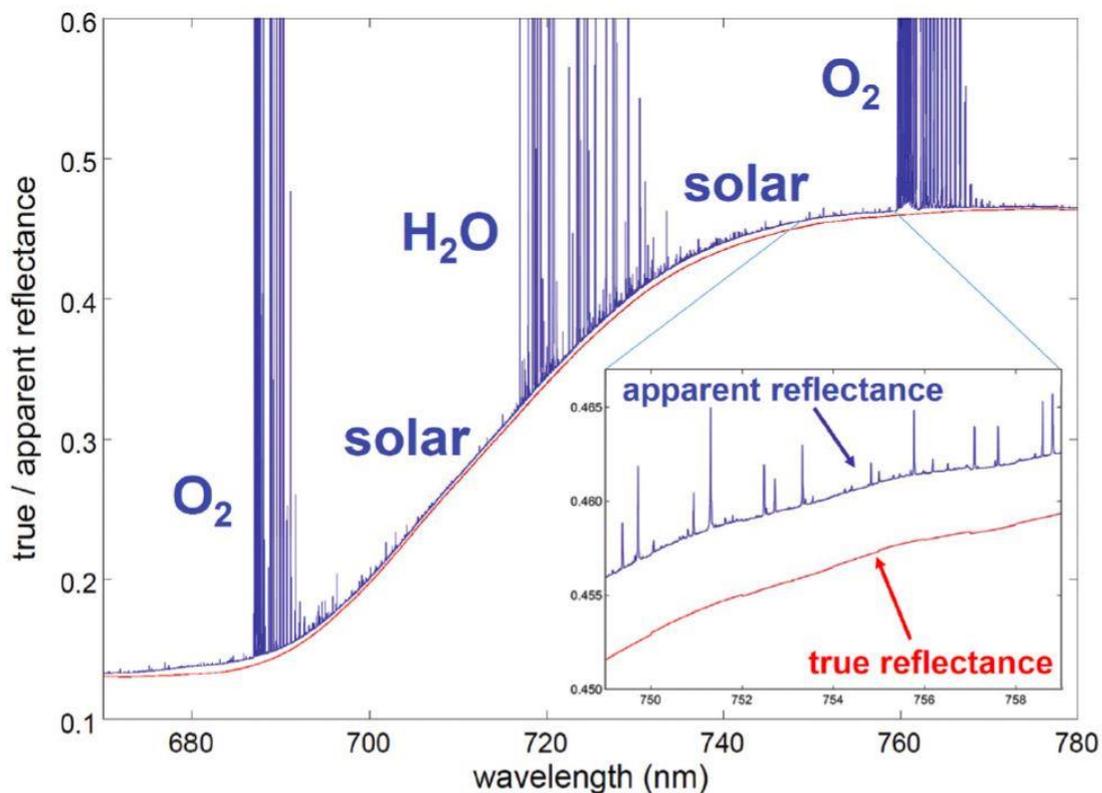


Abbildung 6: Sichtbarer Reflexionsgrad (blau) und echter Reflexionsgrad (rot) innerhalb des SIF-Spektrums. Unterschiede werden durch die Anwesenheit von Wasserstoffabsorptionsbändern oder Fraunhoferlinien, die für Absorption des einfallenden Lichtes sorgen. (Einsatz) Fraunhoferlinien sorgen für geringere Unterschiede als Wasserstoffabsorptionsbänder (ESA 2015: 44).

### 2.2.3. SIF-Ableitung

Für die Ableitung von SIF sind mehrere Methoden nutzbar. PLASCYK (1975) sowie PLASCYK & GABRIEL (1975) entwickelten die sogenannte FLD-Methode (*Fraunhofer Line Depth*), die noch heute als Grundlage vieler weiterer Ableitungsmethoden dient (MERONI et al. 2009: 2041). Diese besagt, dass durch Messungen innerhalb und außerhalb der Fraunhoferlinie sowie der einfallenden Solarstrahlung auf SIF geschlossen werden kann. Darauf aufbauend entwickelten MAIER ET AL. (2003) die 3FLD-Methode und GÓMEZ-CHOVA et al. (2006) sowie MOYA et al. (2006) die cFLD-Methode. Die 3FLD-Methode nutzt zwei Bänder außerhalb (lang- und kurzwelliger) der Fraunhoferlinie, die anschließend gemittelt werden, während die cFLD-Methode Korrekturfaktoren einbaut. Diese drei Methoden sind einsetzbar bei der Verwendung von multispektralen Daten. Bei der Nutzung von Hyperspektraldaten hingegen werden häufig die Methoden iFLD (*improved FLD*), eFLD (*extended FLD*) und SFM (*Spectral Fitting Method*) genutzt. Die iFLD nutzt ähnlich der cFLD Korrekturfaktoren, die anhand von Interpolation der Hyperspektraldaten erhalten werden können. Auf Basis der cFLD und iFLD entwickelten MAZZONI ET AL. (2007) die eFLD-Methode, die drei Absorptionsbänder für die Ableitung von SIF nutzt. Zusätzlich gibt es noch die SFM-Methode, die wiederum einen anderen Ansatz nutzt. Hier werden mathematische Funktionen, die SIF anhand von linearen oder quadratischen Variationen ableiten können, eingebracht (MERONI et al. 2009: 2041f). In dieser Arbeit wird die iFLD-Methode zur Ableitung von SIF genutzt.

Nach der Lambertschen Oberflächenreflexion ( $p$ ) kann die abgehende Strahlung einer Oberfläche ( $L$ ), die hier zusätzlich zum reflektierten Licht der Vegetation auch die emittierte Chlorophyllfluoreszenz beinhaltet, von einem Sensor in einer bestimmten Wellenlänge gemessen werden. Dies wird wie folgt ausgedrückt (RASCHER et al. 2015: 4676f):

$$L_{\lambda} = L_{\lambda}^p + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{(E_{\lambda}^g \cdot R_{\lambda} + f_{\lambda}) \tau \uparrow_{\lambda}}{1 - S_{\lambda} \cdot R_{\lambda}} \quad (1)$$

Hier entspricht  $L^p$  der weggestreuten Strahlung,  $E^g$  ist die globale Einstrahlung mit direkten und diffusen Flüssen, die auf eine Oberfläche eintreffen,  $\tau \uparrow_{\lambda}$  ist die aufsteigende Durchlässigkeit und  $S$  ist die sphärische Albedo. Um SIF und  $p$  letztendlich voneinander zu trennen müssen Sensormessungen der Zielvegetation innerhalb (i) und außerhalb (o) der Wasserstoffabsorptionsbänder durchgeführt werden (Abb. 7). Diese können wie folgt ausgedrückt werden (RASCHER et al. 2015: 4677):

$$\begin{cases} L_i = L_i^p + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{(E_i^g \cdot R_i + f_i)\tau \uparrow_i}{1 - S_i \cdot R_i} \\ L_o = L_o^p + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{(E_o^g \cdot R_o + f_o)\tau \uparrow_o}{1 - S_o \cdot R_o} \end{cases} \quad (2)$$

Die Werte für  $L_\lambda$  können direkt den Messungen entnommen werden. Die atmosphärischen Parameter  $E^g$ ,  $L^p$ ,  $S$  und  $\tau$  werden mit dem atmosphärischen Strahlungstransfermodell von MODTRAN-5 für jede einzelnen Überflug bestimmt. So bleiben vier unbekannte Variablen:  $R_i$ ,  $R_o$ ,  $f_i$  und  $f_o$ . Die Variablen  $R_i$  und  $R_o$  entsprechen der spektralen Reflexion und die Variablen  $f_i$  und  $f_o$  beinhalten die Fluoreszenz jeweils innerhalb und außerhalb der Absorptionsbänder (RASCHER et al. 2015: 4677).

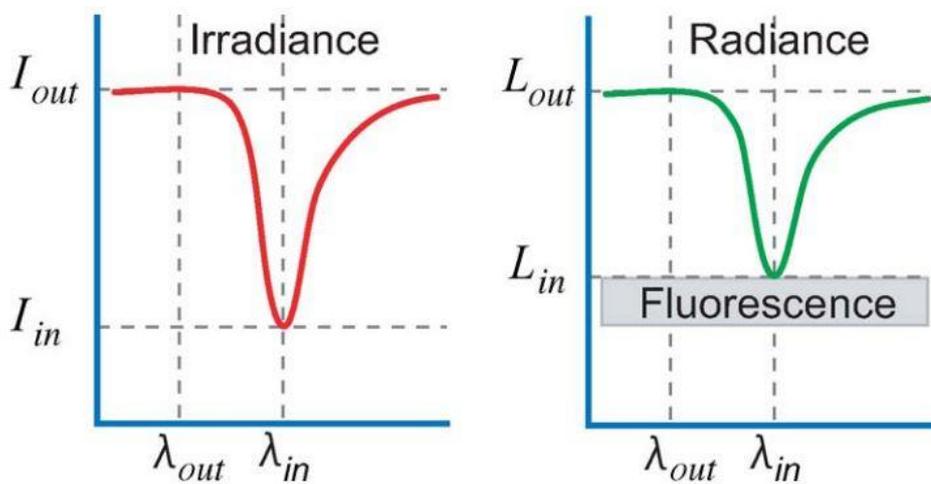


Abbildung 7: Beschreibung der FLD-Methode. (Links: Die solare Bestrahlungsstärke (irradiance) wird durch eine schmale atmosphärische Absorption beeinflusst, Rechts: Die gemessene Strahlung (radiance) zeigt die atmosphärische Absorption mit der teiligen SIF-Emission) (ALONSO et al. 2008: 620).

Um SIF letztendlich abzuleiten wird die Methode der iFLD (*improved Fraunhofer Line Depth*) genutzt, die eine Abwandlung der FLD-Methode nach PLASCYK & GABRIEL (1975) darstellt. Die letztere beschreibt, dass die Strahlung an der Oberfläche der Zielvegetation (L) das Ergebnis der Bestrahlungsstärke (I) multipliziert mit der Reflexion (R) und der Addition der emittierten SIF (f) ist (ALONSO et al. 2008: 620):

$$\begin{cases} L_i = R_i \cdot I_i + f_i \\ L_o = R_o \cdot I_o + f_o \end{cases} \quad (3)$$

Die FLD-Methode besagt, dass die Wellenlängen  $\lambda_i$  und  $\lambda_o$  so eng beieinanderliegen, sodass Reflexion und SIF als konstant betrachtet werden können (ALONSO et al. 2008: 620):

$$\lambda_i \approx \lambda_o \quad R_i = R_o \quad f_i = f_o \quad (4)$$

Unter dieser Annahme können nun folgende Gleichungen für die Reflexion und SIF abgeleitet werden (ALONSO et al. 2008: 621):

$$\begin{cases} R_{FLD} = \frac{L_o - L_i}{I_o - I_i} \\ f_{FLD} = \frac{I_o \cdot L_i - L_o \cdot I_i}{I_o - I_i} \end{cases} \quad (5)$$

Die beschriebenen Annahmen führen allerdings zu Beschränkungen der Methode. ALONSO et al. (2008) entwickelten daher die iFLD-Methode, welche durch die Einbindung der Abweichung der Reflexions- und SIF-Werte eine Verbesserung gegenüber der FLD-Methode darstellt. Die iFLD-Methode nutzt Korrekturfaktoren  $\alpha_R$  und  $\alpha_F$  ausgedrückt, wodurch Reflexion und SIF folgendermaßen ausgedrückt werden kann (ALONSO et al. 2008: 621):

$$R_o = \alpha_R \cdot R_i \quad f_o = \alpha_F \cdot f_i \quad (6)$$

Diese Gleichungen können nun in Gleichung 3 eingefügt werden (ALONSO et al. 2008: 621):

$$\begin{cases} L_i = R_i \cdot I_i + f_i \\ L_o = \alpha_R \cdot R_o \cdot I_o + \alpha_F \cdot f_o \end{cases} \quad (7)$$

Somit kann die iFLD-Methode wie folgt ausgedrückt werden (ALONSO et al. 2008: 621):

$$\begin{cases} R_i = \frac{L_i - f_i}{I_i} \\ f_i = \frac{\alpha_R \cdot I_o \cdot L_i - L_o \cdot I_i}{\alpha_R \cdot I_o - \alpha_F \cdot I_i} \end{cases} \quad (8)$$

Um die Korrekturfaktoren  $\alpha_R$  und  $\alpha_F$  quantifizieren zu können, wäre es nötig SIF und die Reflexion im Voraus zu kennen, was nicht möglich ist. Das Hinzufügen der Variablen  $R_{app}$  wird daher genutzt, um die Korrekturfaktoren zu berechnen (CENDRERO-MATEO et al. 2019:6):

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_R = \frac{R_{app,o}}{\tilde{R}_{app,i}} \\ \hat{\alpha}_F \approx \frac{I_o}{\tilde{I}_i} \cdot \hat{\alpha}_R \end{cases} \quad (9)$$

Hier entspricht  $R_{app}(\lambda_o)$  dem sichtbaren Reflexionsgrad außerhalb des Absorptionsbandes und  $R_{app}(\lambda_i)$  dem innerhalb des Absorptionsbandes. Um  $\tilde{R}_{app}(\lambda_i)$  zu berechnen, wird eine nicht-lineare Interpolation des sichtbaren Reflexionsgrades durchgeführt, um die atmosphärische Absorption zu entfernen.  $\tilde{E} \downarrow(\lambda_i)$  wird anhand einer Interpolation der Strahlungsintensität kalkuliert, woraus  $E \downarrow$  abgeleitet werden kann, welches von atmosphärischer Absorption unbeeinflusst ist. So können  $\alpha_R$  und  $\alpha_F$  durch die Koeffizienten  $\hat{\alpha}_R$  und  $\hat{\alpha}_F$  ausgetauscht werden, sodass SIF folgendermaßen abgeleitet werden kann (CENDRERO-MATEO et al. 2019: 6):

$$f_i = \frac{\hat{\alpha}_R \cdot I_o \cdot L_i - L_o \cdot I_i}{\hat{\alpha}_R \cdot I_o - \hat{\alpha}_F \cdot I_i} \quad (10)$$

Dieses Verfahren wurde im Bereich der beiden Wasserstoffabsorptionsbänder um 680 und 760 nm durchgeführt, um die jeweilige Chlorophyllfluoreszenz zu ermitteln. Da die beiden Werte jeweils eine der beiden Photosysteme widerspiegeln, kann das Verhältnis ( $F_{Ratio}$ ) der beiden ebenso Erkenntnisse über die Bedingungen der Vegetation aufzeigen (WIENEKE et al. 2018: 248). Ač et al. (2015) beschreibt bspw. den Effekt von Wasser-, Temperatur- und Stickstoffstress auf die Ausprägung von  $F_{Ratio}$ . Aus diesem Grund wird auch  $F_{Ratio}$  zur Untersuchung innerhalb dieser Arbeit genutzt.

Darüber hinaus wird die totale Chlorophyllfluoreszenz ( $F_{tot}$ ) in dieser Arbeit genutzt.  $F_{tot}$  gibt das integrierte SIF-Signal über das komplette Spektrum wieder (Vgl. Abb. 5), was anhand der beiden abgeleiteten Maxima von  $F_{687}$  und  $F_{760}$  berechnet werden kann. Für die Berechnung gibt es eine empirisch abgeleitete Formel, die wie folgt lautet (ESA 2015: 53):

$$F_{tot} = 39,2435 \cdot F_{687} + 83,6814 \cdot F_{760} \quad (11)$$

Bei Betrachtung der Ergebnisse von ROSSINI et al. (2016) liegt ein möglicher Wertebereich für  $F_{687}$  zwischen 0 und  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , während der Wertebereich von  $F_{760}$  bis  $5,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  steigen kann. Die Ergebnisse von WINIEKE et al. (2016) steigen für beide Bänder nicht über  $2,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ .

Die Intensität von  $F_{tot}$  wird mit einem Wertebereich von bis zu  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  angegeben. Höhere Werte sind auf Extremereignisse zurückzuführen (ESA 2015: 52).

#### 2.2.4. Datenaufnahme durch HyPlant

Die in dieser Arbeit genutzten Szenen wurden durch den Sensor HyPlant aufgenommen. HyPlant wurde vom Forschungszentrum Jülich in Kooperation mit dem finnischen Hersteller *SPECIM Spectral Imaging Ltd.* entwickelt, um die Lücke räumlicher Auflösung zwischen Metern und Kilometern für SIF zu schließen. *HyPlant* besteht aus zwei Modulen: DUAL und FLUO. Das DUAL-Modul beinhaltet einen *push-broom* Scanner, der elektromagnetische Energie im hyperspektralen Bereich von 380 nm bis 2.500 nm kontinuierlich aufnimmt. Die spektrale Auflösung liegt im sichtbaren und nahen infraroten Licht bei 3 nm und im weiten infraroten Wellenlängenbereich bei 10 nm. Das FLUO-Modul hingegen ist spezialisiert auf die Aufnahme des Fluoreszenzsignals der Vegetation, weshalb der hier verwendete Sensor eine hohe spektrale Auflösung von 0,25 nm aufweist. Das interessante Fluoreszenzsignal beschränkt sich allerdings nur auf den Spektralbereich der zwei Wasserstoffabsorptionsbänder, die zwischen 670 und 780 nm und somit an den Grenzen des für den Menschen sichtbaren Lichtes liegen (RASCHER ET AL. 2015: 4674). Beide Module sind auf einer gemeinsamen Plattform installiert, die einen vereinten FOV (*field of view*) gewährleistet. Zudem kann HyPlant sowohl bodennah als auch in der Luft, montiert an Flugzeugen Hyperspektralaufnahmen der Erdoberfläche durchführen (Forschungszentrum Jülich 2015: 11).

Insgesamt weist HyPlant eine Anzahl von 1.646 Bändern auf, wovon 1.024 auf das FLUO-Modul fallen und 622 auf das DUAL-Modul. Bei einer Flughöhe von 600 m liegt die Fächerbreite der Sensoren bei 380 m, womit die Pixel eine Kantenlänge von 1 m besitzen. Die Kantenlänge der Pixel steigt bei einer Flughöhe von 1.780 m auf 3 m an (RASCHER et al. 2015: 4674f; Forschungszentrum Jülich 2015: 13).

Zusätzlich sind weitere Module für die Stromversorgung und die Datengenerierung verbaut. Diese beinhalten auch die Systemkontrollen sowie das GPS (*Global Positioning System*) und INS (*Internal Navigation System*). Anhand des GPS und INS können die geographische Position und auch die Neigung des Systems gemessen und den Daten zugeordnet werden, sodass die Georeferenzierung der Bilder und weitere Korrekturen synchron durchgeführt werden können (Forschungszentrum Jülich 2015: 11).

Mit diesen Eigenschaften reiht sich HyPlant in die Reihe weiterer moderner Spektrometer ein, wie bspw. APEX, AVIRIS, HySpex und CASI (RASCHER et al. 2015: 4674).

Im Jahr 2018 fanden sechs Überflüge statt, die für diese Arbeit genutzt wurden (Tab. 1). Zwei Flüge wurden am 26. Juni durchgeführt, wovon der erste zwischen 13:06 Uhr und 15:10 Uhr und der zweite zwischen 15:22 Uhr und 15:48 stattfanden. Die erste Szene wurde bei einer Flughöhe von 1800 m und die zweite bei 600 m aufgenommen. Der dritte Überflug vom 27. Juni wurde

bei einer Flughöhe von 600 m zwischen 10:36 und 11:02 Uhr absolviert. Am 29. Juni wurden zwei weitere Überflüge vollzogen, die beide eine Flughöhe von 600 m vorsahen. Diese wurden zum einen zwischen 11:41 Uhr und 12:09 und zum anderen zwischen 15:07 Uhr und 15:34 durchgeführt. Der letzte Überflug fand am 2. August statt, der ebenfalls bei einer Flughöhe von 600 m zwischen 12:27 Uhr und 12:54 Uhr vollzogen wurde. Zum Zeitpunkt der Überflüge gab es keine Beeinträchtigung der Lichtverhältnisse durch Wolken.

Nach der Datenaufnahme wurde eine radiometrische Kalibration der Daten beider Sensoren durchgeführt. Die Daten des DUAL-Sensors wurden anschließend einer Atmosphärenkorrektur durch ATCOR unterzogen, während die Daten des FLUO-Sensors eine spektrale Dekonvolution erfahren. Nach der SIF-Berechnung anhand der iFLD-Methode wurden alle Daten georektifiziert.

Diese Daten wurden vom IBG-2 (Institut für Bio und Geowissenschaften: Pflanzenwissenschaften) des Forschungszentrum Jülich berechnet und bereitgestellt.

*Tabelle 1: Zeitpunkte der Überflüge mit dem Sensor HyPlant mit der zugehörigen Flughöhe.*

Datum	26.06.2018	26.06.2018	27.06.2018	29.06.2018	29.06.2018	02.08.2018
Start der Aufnahme	13:06	15:22	10:36	11:41	15:07	12:27
Ende der Aufnahme	15:10	15:48	11:02	12:09	15:34	12:54
Flughöhe [m]	1.800	600	600	600	600	600

### 2.2.5. Vergleichswerte durch FloX-Daten

Neben den SIF-Ableitungen durch HyPlant wurden weitere SIF-Messungen durch eine FloX (*Flourescence boX*) durchgeführt, die an der nördlichen EC-Station installiert wurde. Diese misst die einfallende und ausgehende Strahlung innerhalb der beiden Wasserstoffabsorptionsbänder und ermöglicht eine höhere temporale Auflösung in ca. 1-minütigen Intervallen. Die spektrale Auflösung liegt bei 0,3 nm im Bereich des SIF-Spektrums. Hinzu kommen weitere Messungen in einem spektralen Bereich zwischen 400 und 900 nm, um das Spektrum des sichtbaren und des nahen infraroten Lichtes abzudecken (CAMPBELL et al. 2019: 7).

Die gemessenen Daten wurden nach den Tagen der Überflüge gefiltert. Ebenso wurden die Datenpunkte nach der E-Stabilität ( $0 \% < \text{E-Stabilität} > 0,25 \%$ ) und dem Sonnenzenitwinkels

(SZA, < 50°) ausgewählt. Der niedrige SZA verhindert durch den Sensor gemessene Artefakte, die aufgrund niedriger Lichtwerte entstehen (CAMPBELL et al. 2019: 8) Die E-Stabilität beschreibt die Veränderung der Bestrahlungsstärke innerhalb eines Messzyklus. Die FloX wurde zum Zeitpunkt der Ernte abgebaut, weshalb nur Daten für drei der vier Überflugstage vorhanden sind.

### 2.3. Schätzung der pflanzlichen Entwicklungsstadien

Da leider keine Dokumentation der Entwicklungsstadien der im Untersuchungsort befindlichen Feldfrüchte vorhanden ist, werden die Entwicklungsstadien anhand des NDVI (*Normalized Differenced Vegetation Index*) bestimmt. Dieser Vegetationsindex (VI) wird in der Regel dafür genutzt, um vitale Vegetation von absterbender Vegetation bzw. vegetationslosen Flächen zu unterscheiden. Dies funktioniert über die Nutzung von Bändern im sichtbaren roten (VISR) und nahen infraroten (NIR) elektromagnetischen Spektrum (Vgl. Formel (12)), da diese Spektralbereiche eine inverse Beziehung bezüglich vitaler Vegetation aufweisen, was mit einer starken Reflexion im nahen Infrarot und einer geringen Reflexion im sichtbaren roten Licht beschrieben wird. Bei absterbender Vegetation steigt der Anteil des sichtbaren roten Lichtes und der Anteil des nahen Infraroten Lichtes fällt. Der NDVI wird wie folgt berechnet (CAMPBELL & WHYNNE 2011: 483ff):

$$NDVI = \frac{NIR - VISR}{NIR + VISR} \quad (12)$$

Der Wertebereich des NDVI liegt zwischen +1 und -1 (WILLEMS et al. 2009: 986), wobei Flächen mit hoher pflanzlicher Vitalität höhere Werte besitzen und ohne Vegetation in einem Wertebereich um 0 zu finden sind (LILLESAND et al. 2015: 362). Der NDVI wurden anhand der Aufnahmen von HyPlant für jeden Überflug vom IBG-2 des FZJ berechnet und bereitgestellt.

### 2.4. Eddy-Kovarianz

#### 2.4.2. Physikalischer Hintergrund

Die Eddy-Kovarianz-Methode (EC) ist die direkteste Art den vertikal turbulenten Fluss von Impulsen, Energie und Gasen zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre zu messen (RANNIK ET AL. 2016: 5163). So ist es möglich den Austausch von latenter und sensibler Wärme als auch

Gasen wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Stickstoffdioxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) zu messen. Mögliche Untersuchungsgebiete sind häufig Wasser- und Agrarflächen sowie weitere Ökosysteme als auch Industriegebiete, die eine Fläche von ein paar Hundert bis zu Millionen Quadratkilometern aufweisen können (BURBA 2013: 2). Vereinfacht dargestellt können Luftströme als horizontale Bewegungen mehrerer rotierender Eddys betrachtet werden (Abb. 8) (BURBA 2013: 12). Eddys sind Verwirbelungen in der Atmosphäre, die wiederum aus kleineren Eddys bestehen können und in unterschiedlichen Größen, Stärken und Geschwindigkeiten auftreten können (CUSHMAN-ROISIN 2019: 135). Jeder Eddy hat dreidimensionale Komponenten, welche die vertikalen Bewegungen miteinbeziehen. Mit kürzerer Distanz zur Erdoberfläche erhöht sich die Wahrscheinlichkeit vom Vorkommen kleinerer Eddys, die dort für den Haupttransport verantwortlich sind, da diese eine höhere

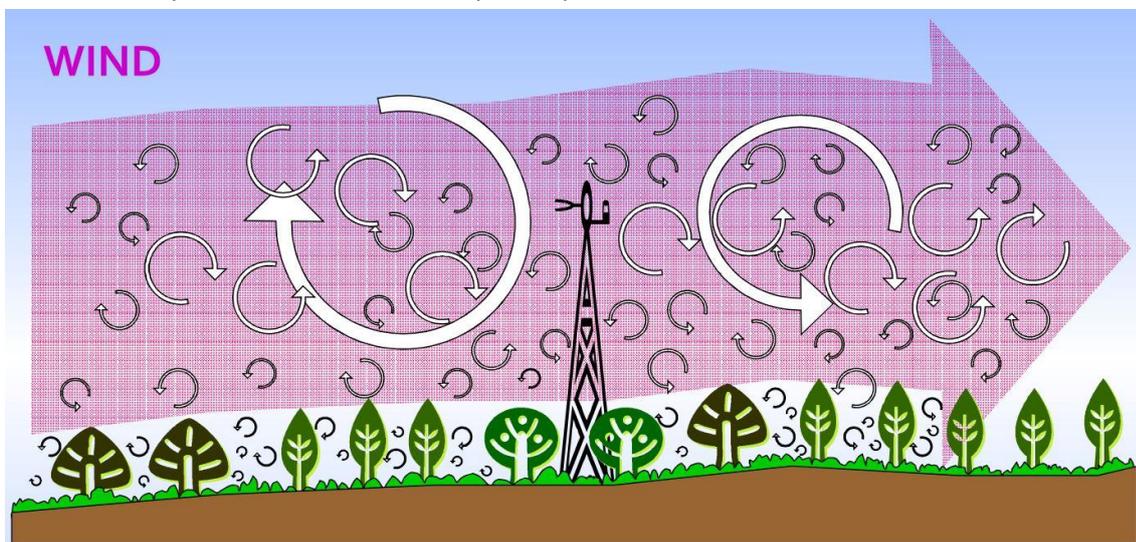


Abbildung 8: Darstellung der Zusammensetzung eines Luftstroms aus mehreren rotierenden Eddys (BURBA & ANDERSON 2010: 16).

Rotationsfrequenz aufweisen. Währenddessen steigt die Wahrscheinlichkeit größerer Eddys mit zunehmender Entfernung zur Erdoberfläche. Diese Eddys besitzen allerdings eine geringere Frequenz, die hier wiederum für die Haupttransport entscheidend ist. Somit wird der Stofftransport von Eddys durchgeführt, welche unterschiedliche Ausmaße und Frequenzen aufweisen. Die Frequenzen können Zehntelsekunden bis Stunden betragen. Ein Eddy bewegt ein Luftpaket mit einer bestimmten Geschwindigkeit Richtung Erdoberfläche, während ein weiterer Eddy ein anderes Luftpaket in die gegengesetzte Richtung befördert (Abb. 9). Jedes Luftpaket hat bestimmte Charakteristika, welche beispielsweise die Menge von Gasen, Temperatur und Luftfeuchte beinhalten. Durch die Messung der Transportgeschwindigkeit und der Eigenschaften kann deren Differenz bestimmt werden, welche letztendlich den Stofffluss beschreibt. Somit ist die EC-Methode ein Zusammenspiel von Messungen vertikalen Windes und der zu untersuchenden Gase (BURBA 2013: 12f). Von einer positiven Kovarianz zwischen

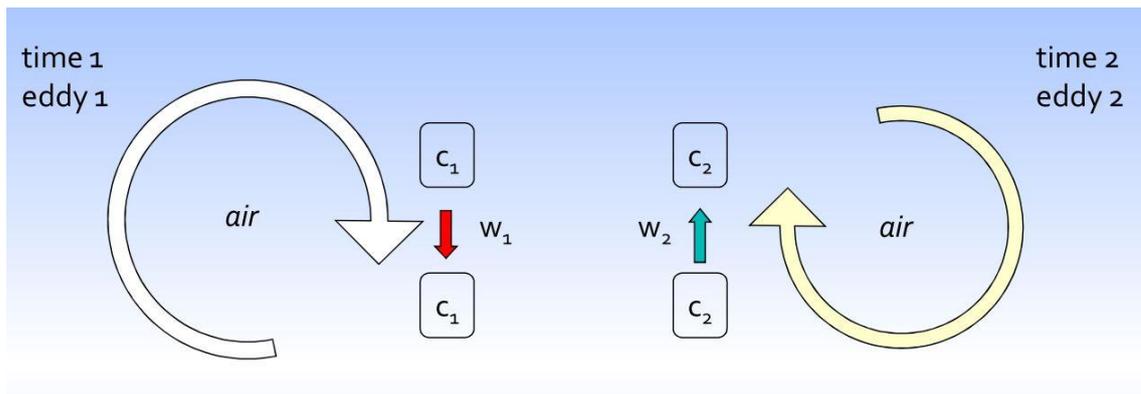


Abbildung 9: Darstellung der Funktionsweise der EC-Methode. Links: Eddy 1 bewegt Luftpaket  $c_1$  mit der Geschwindigkeit  $w_1$  hinab. Rechts: Eddy 2 bewegt Luftpaket  $c_2$  mit der Geschwindigkeit  $w_2$  hinauf. Jedes Luftpaket besitzt Eigenschaften über Stoffkonzentrationen, Temperatur oder Luftfeuchte. Die Differenz beider Vorgänge beschreibt den Stofffluss (BURBA & ANDERSON 2010: 17)

vertikalen Windbewegungen und bspw.  $\text{CO}_2$  spricht man, sobald der Stofffluss von der Biosphäre in die Atmosphäre gerichtet ist, also der  $\text{CO}_2$ -Anteil in der Atmosphäre erhöht wird. Bei der negativen Kovarianz wird der  $\text{CO}_2$ -Anteil in der Atmosphäre reduziert (BURBA 2013: 16).

Der vertikale Stofffluss kann für turbulente Bewegungen physikalisch wie folgt beschrieben werden (BURBA 2013: 18):

$$F = \overline{p_d w s} \quad (13)$$

Der Stofffluss ( $F$ ) ist gleich dem mittleren Produkt der Luftdichte ( $p_d$ ), der vertikalen Windgeschwindigkeit ( $w$ ) und des trockenen Stoffmengenanteils ( $s$ ) des zu messenden Gases (BURBA 2013: 18). Anschließend wird die Reynolds-Gleichung genutzt, welche die Zerlegung der Zeitreihe jeder Variablen ( $\zeta$ ) durchführt, sodass eine Variable ( $\bar{\zeta}$ ) mit einem Mittelwert innerhalb einer Zeitspanne und eine Variable mit deren Abweichung ( $\zeta'$ ) entstehen (FOKEN et al. 2012: 4):

$$\zeta = \bar{\zeta} + \zeta' \quad (14)$$

Hierbei beträgt die Zeitspanne etwa eine halbe Stunde mit einer Messfrequenz von 0,005 bis 0,01 Sekunden, von der die Abweichung bestimmt wird. Dies wird mit jeder Variablen der obigen Formel durchgeführt, sodass folgende Formel entsteht (BURBA 2013: 18):

$$F = \overline{(p_d + p'_d) (w + w') (s + s')} \quad (15)$$

Nach dem Öffnen der Klammern sieht die Formel wie folgt aus:

$$F = (\overline{p_d w s} + \overline{p_d w s'} + \overline{p_d w' s} + \overline{p_d w' s'} + p'_d \overline{w s} + p_d \overline{w s'} + p'_d \overline{w' s} + p'_d \overline{w' s'}) \quad (16)$$

Hier können nun die durchschnittlichen Abweichungen vom Durchschnitt entnommen werden, die immer 0 ergeben, sodass die Formel nun folgendermaßen aussieht:

$$F = (\overline{p_d w s} + \overline{p_d w' s'} + p_d \overline{w s'} + p'_d \overline{w' s} + p'_d \overline{w' s'}) \quad (17)$$

Außerdem können Fluktuationen in der Luftdichte als vernachlässigbar betrachtet werden. Diese Annahme ist jedoch abhängig von der Umgebung, weshalb Untersuchungen in Gebieten nahe Gebirgsketten, die im Zusammenhang mit starken Winden stehen, die Fluktuationen der Luftdichte wieder miteinbezogen werden müssen. Zudem kann der durchschnittliche vertikale Luftstrom außer Acht gelassen werden, sofern die Messungen in einem homogenen Terrain stattfinden. Somit ergibt sich folgende Formel für Eddy-Flussmessungen (BURBA 2013: 19).

$$F \approx \overline{p_d w' s'} \quad (18)$$

Dies ist die klassische Formel für die Berechnung des Eddy-Flusses vieler Stoffe. Für die Berechnung des Flusses von sensibler und latenter Wärme gibt es weitere Formeln und auch für die Messung Wasserdampf gibt es mehrere Formeln, die meist abhängig von den genutzten Einheiten sind (BURBA 2013: 20).

Darüber hinaus ergeben sich weitere Annahmen, die für die Nutzung der EC-Methode getroffen werden müssen. Der Messpunkt sollte eine Windrichtung repräsentieren und die Messhöhe sollte sich für die Untersuchung in der Grenzschicht zwischen Biosphäre und Atmosphäre befinden. Zudem sollte der Fußabdruck adäquat für die Messung sein. Der Stofffluss sollte turbulent sein und die Turbulenzen sollten durch die Installation der Instrumente nicht verzerrt werden (BURBA 2013: 21).

### 2.4.3. Korrekturverfahren

Aufgrund vieler Annahmen bei der Kalkulation des EC-Flusses müssen viele Korrekturen durchgeführt werden, sofern die Annahmen nicht zustimmen. Diese Korrekturen sind eng mit der Qualitätssicherung der Daten verbunden und beginnen mit der Eliminierung aller Ausreißer und fehlenden Werte. Allerdings gibt es auch Ausreißer, welche aus elektronischen Problemen resultieren, die jedoch innerhalb der möglichen Werteskala liegen. Diese können anhand eines

Tests, der die Standardabweichung nutzt, aussortiert werden. Generell wird dazu geraten Messreihen, die mehr als 1% an Ausreißern aufweisen, nicht zu nutzen (FOKEN 2017: 163f).

Bei der Nutzung eines Datenspeichers für mehrere Messungen kann es zu Fehlern der zeitlichen Angaben kommen, sodass Daten falsche Zeitpunkte zugeordnet werden. Diese Fehler können normalerweise durch bestimmte Software behoben werden, jedoch kann sich die zeitliche Verschiebung mit der Zeit verändern, sodass Analysen von Kreuzkorrelationen vor der Durchführung weiterer Berechnungen empfohlen werden (FOKEN 2017: 164).

Die Neigungskorrektur wird aufgrund der Annahme, dass der mittlere vertikale Wind vernachlässigt werden kann, durchgeführt. Dieses Korrekturverfahren rotiert die horizontale Ebene in die mittlere Windrichtung. Die Zwei-Rotations-Methode ist aufgrund ihrer einfachen Handhabung das Standardverfahren in vielen Netzwerken, welche erst die z-Achse in die mittlere Windrichtung dreht und anschließend auch die y-Achse. Zudem gibt es noch die Drei-Rotations-Methode, die noch die x-Achse in die mittlere Windrichtung rotiert. Jedoch werden die Stoffflüsse dadurch nicht signifikant beeinflusst und darüber hinaus führt diese zu weiteren Problemen, sodass sich dieses Verfahren als nicht empfehlenswert darstellt. Eine weitere beliebte Methode ist die sogenannte Planar-fit-Methode, welche die Rotation zum mittleren Strömungsfeld ausrichtet (nach PAW U et al. (2000) und WILCZAK et al. (2001)). Hier wird die Abweichung des Messgerätes zum mittleren Stromfeld über einen längeren Zeitraum von Tagen bis Wochen berechnet. Der Standort und die Neigung des Anemometers dürfen hierbei nicht verändert werden, sodass die Nutzung eines Inclinometers hilfreich ist, um das Anemometer wieder in die Ausgangslage zurückzuführen (FOKEN 2017: 164ff).

Zusätzlich muss die spektrale Auflösung des Messsystems an das aktuell vorliegende Turbulenzspektrum angepasst werden. Dies beinhaltet die Korrektur der zeitlichen Auflösung des Sensors, der Messstrecke und des Abstandes zwischen unterschiedlichen Messstrecken. Aus diesen drei Faktoren zusätzlich zur Messstrecke des Schallanemometers und des Sensors zur Gasflussmessung kann eine Transferfunktion gebildet werden, die für die Korrektur verantwortlich ist (FOKEN 2017: 168).

In Bereichen mit niedrigen Frequenzen, in denen die Messperiode länger als 30 Minuten betragen kann, muss die spektrale Korrektur auf andere Weise durchgeführt werden. Hier wird das Durchschnittsintervall erweitert, indem Trends extrahiert werden. Im Normalfall reicht die Extraktion des linearen Trends schon aus, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Allerdings ergibt sich dabei das Problem, dass niedrigere Frequenzen mit dem turbulenten Stofffluss assoziiert werden könnten, was jedoch nicht der Fall ist. Mit dem sogenannten Ogiven-Test wird zuerst herausgefunden, ob der Stofffluss seinen maximalen Wert innerhalb der normalen Messperiode besitzt. „Wenn der Wert des Integrals für niedrige Frequenzen gegen einen

konstanten Wert (Fluss) konvergiert und eine Erweiterung im langwelligen Bereich keine merkliche Veränderung bringt, ist keine Korrektur erforderlich“ (FOKEN 2006a: 118). Die Korrektur ist jedoch laut FOKEN et al. (2006b) in 80% der Fälle nicht notwendig und wird deshalb nur in seltenen Fällen eingesetzt (FOKEN 2017: 170).

Bei Temperaturen, die mit einem Schallanemometer gemessen wurden und somit als Schalltemperatur bezeichnet werden, sind ebenfalls Korrekturen nötig, da die Schalltemperatur minimale Abweichung zur virtuellen Temperatur aufweist. Nach der Umrechnung wird die sogenannte Querwindkorrektur nach LIU et al. (2001) genutzt, um den mit der Schalltemperatur gemessenen Wärmestrom in den Auftriebsstrom zu überführen (FOKEN 2017: 170).

Aufgrund der Vernachlässigung von Dichtefluktuationen, begrenzten Luftfeuchteströme an der Oberfläche und der Gaskonzentrationsmessungen pro Volumen anstatt pro Masse, muss die WPL-Korrektur (benannt nach den Wissenschaftlern WEBB, PEARMAN und LEUNING) nach WEBB et al. (1980) durchgeführt werden. Die WPL-Korrektur fällt stärker aus, sobald die turbulenten Fluktuationen gering sind im Vergleich zur mittleren Konzentration, was z.B. bei CO<sub>2</sub> eine Korrektur von bis zu 50% bedeuten kann (FOKEN 2017: 170f).

#### 2.4.4. Datenaufnahme

Im Untersuchungsgebiet Selhausen werden seit 2007 EC-Daten aufgenommen. Im Jahre 2011 musste die Messposition gewechselt werden, was den Beginn einer neuen Untersuchungsperiode bedeutete, die bis zum Ende des Jahres 2015 lief. Seitdem werden weiterhin EC-Messungen mit denselben Messgeräten durchgeführt (TERENO 2019: o.S.).

Die Messstationen im Untersuchungsgebiet Selhausen beinhalten ein dreidimensionales Schallwindmessgerät (Modell CSAT-3, Campbell Scientific Inc.), das die Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die Schalltemperatur misst. Dazu sind die Messstationen mit Infrarotgasanalysegeräten (Modell LI-7500, Li-Cor Inc.) bestückt, die eine offene Messstrecke besitzen, welche die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und die absolute Luftfeuchtigkeit messen (NEY & GRAF 2018: 452). Die beiden Geräte wurden jeweils in einer Höhe von 2 m installiert.

Die Berechnung des Eddy-Stoffflusses wurde mit dem Programm TK3.11 durchgeführt, welches für die Qualitätssicherung und die Datenkorrektur zur Verfügung steht (NEY & GRAF 2018: 452).

### 2.4.5. Konvertierung von NEE zu GPP

Das Ziel von den hier vorgenommenen CO<sub>2</sub>-Messungen mit der EC-Methode ist die Ableitung der Primärproduktion des Ökosystems. Da die EC-Methode lediglich den Netto-Ökosystem-Austausch (NEE) gemessen hat, kommen Algorithmen gemäß folgender Definition zum Einsatz:

$$NEE = R_{eco} + GPP \quad (19)$$

NEE wird hiermit durch die Bestandteile der Primärproduktion (GPP) und die Respiration des Ökosystems ( $R_{eco}$ ) definiert. Hierzu ist es wichtig, dass die genutzten Algorithmen in der Lage sind die Werte der beiden Bestandteile abzuschätzen. Problematisch sind die Abschätzungen dahingehend, dass die Faktoren jeweils unendliche Werte annehmen können, sodass weitere Informationen über den Prozess des Stoffflusses wichtig sind. Mehrere Methoden stehen für die Partitionierung zur Verfügung. Diese werden grob differenziert in Algorithmen, die  $R_{eco}$  direkt in der Nacht messen oder welche, die Lichtempfindlichkeitskurven (*light response curve*) sowohl von Tages- und Nachtmessungen als auch nur von Tagesmessungen nutzen (REICHSTEIN et al. 2012: 263ff).

Die Nutzung der Lichtempfindlichkeitskurve (wie bspw. nach LASSLOP et al. (2010)) beinhaltet die Effekte von Einstrahlung, Wasserdampfdefiziten und der Temperatur auf  $R_{eco}$ . Die rechteckige Hyperbel, die hier oft zum Einsatz kommt, nutzt die globale Einstrahlung, die auch durch die PAR(photosynthetisch aktive Strahlung)-Photonen-Flussdichte ersetzt werden kann. Zudem kommen Variablen ins Spiel, welche die Steigung der Kurve und den Punkt der GPP-Sättigung widerspiegeln. Der Schnittpunkt, an dem kein Licht vorhanden ist, repräsentiert letztendlich  $R_{eco}$ . Weitere ähnliche Varianten sind vorhanden (REICHSTEIN et al. 2012: 273).

Bei der Methode nach REICHSTEIN et al. (2005), welche die Nachtmessungen als Grundlage für die Abschätzung von GPP und  $R_{eco}$  nehmen, ist es wichtig, eine gewisse Datenqualität sicherzustellen. Probleme können wegen fehlender Turbulenzen in der Nacht auftreten. Turbulenzen, die essenziell für die Durchführung der EC-Methode sind, kommen nachts nur selten auf, sodass kein turbulenter Stofffluss zwischen Bio- Atmosphäre stattfindet. Bei ausreichender Datenqualität umfassen alle NEE-Datenpunkte, die in der Nacht ohne photosynthetische Aktivität gemessen wurden,  $R_{eco}$  (REICHSTEIN et al. 2012: 266ff).

Das Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena hat hierzu ein Online-Tool namens REddyProcWeb programmiert, welches diese zwei Algorithmen zur Abschätzung von  $R_{eco}$  und GPP zur Verfügung stellt. Es steht ebenso als R-Paket für den Gebrauch ohne Internet zur Verfügung. Neben der Aufteilung in GPP und  $R_{eco}$  enthält das Programm eine Funktion zur

Füllung und Ersetzung von fehlerhaften oder nicht vorhandenen Daten (Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: o.S). In dieser Arbeit wurde die Methode nach REICHSTEIN et al. (2005) durchgeführt.

Der Teilungsalgorithmus nach REICHSTEIN et al. (2005) arbeitet mit drei Schritten. Beim ersten Schritt wird die Temperatursensitivität ( $E_0$ ) für den ganzen Datensatz abgeschätzt. Im zweiten Schritt wird die Referenztemperatur  $R_{ref}$  für das ganze Jahr bestimmt. Abschließend kann mit diesen abgeschätzten Werten NEE in GPP und  $R_{eco}$  aufgeteilt werden. Die Datenauswahl beschränkt sich auf halbstündliche Daten mit einer globalen Einstrahlung, die weniger als 10  $W/m^2$  vorweist und ebenso mit dem Sonnenauf- und untergang verglichen wurde. Zusätzlich wurde der gesamte Untersuchungszeitraum in einzelne Perioden unterteilt, die standardisiert bei 14 Tagen liegen. Innerhalb dieser Perioden wird überprüft, ob mehr als sechs Datenpunkte zur Verfügung stehen und ob sich die Temperaturspanne über 5°C befindet, da  $R_{eco}$  nur unter diesen Bedingungen abgeleitet werden kann (Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: o.S.). Der Algorithmus nutzt das Regressionsmodell nach LLOYD & TAYLOR (1994). Das Modell wird an  $R_{eco}$  und der Temperatur (T) des Bodens oder der Luft angepasst.

$$R_{eco}(T) = R_{eco,ref} \cdot e^{E_0 \left( \frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0} \right)} \quad (20)$$

Der Regressionsparameter  $T_0$  liegt konstant bei -46,02°C und die Referenztemperatur liegt bei 15°C (Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: o.S). Die Variable  $E_0$ , der die Aktivierungsenergie beschreibt und die Temperaturempfindlichkeit bestimmt, kann unterschiedlich ausfallen. Die drei niedrigsten Standardabweichungen von  $E_0$  pro Periode entsprechen der passendsten Wiedergabe der kurzzeitigen Temperaturverhaltens von  $R_{eco}$ . Alle Werte des Gesamtzeitraums werden anschließend gemittelt und repräsentieren den Gesamtdatensatz (Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: o.S.).

Nachfolgend wird die saisonale Kurve der Respiration in Bezug auf die Referenztemperatur ( $R_{eco,ref}$ ) abgeschätzt. Hierfür werden die Nachtdaten in Intervalle von vier Tagen aufgeteilt und eine nicht-lineare Regression von  $R_{eco}$  gegen die Temperatur ausgeführt (siehe Formel (20)). Hierbei wird  $E_0$  über  $E_{0,avg}$  für eine Zeitfenster von sieben Tagen festgelegt. Der Wert von  $R_{eco,ref}$  wird daraufhin dem zentralen Zeitpunkt der Periode zugeordnet und linear zwischen den Perioden interpoliert (Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: o.S.).

$R_{eco}$  kann anschließend in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt werden, da die Parameter  $E_0$  und  $R_{eco,ref}$  halbstündig zur Verfügung stehen (Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: o.S.).

Diese Daten wurden vom IBG-3 (Institut für Bio und Geowissenschaften: Agrosphäre) des Forschungszentrum Jülich berechnet und bereitgestellt.

## 2.5. Berechnung der Footprints

Die Messungen, welche an einem bestimmten Punkt durchgeführt werden, entsprechen nicht den tatsächlichen Gegebenheiten unterhalb der Messstation. Stattdessen repräsentiert der Messwert einen Einflussbereich an der Luvseite der Messstation. Dieser Bereich hat unterschiedliche Bezeichnungen: So wird er von SCHMID & OKE (1988) als Quellgewichtsfunktion (*source weight function*) und von LECLERC & THURTHELL (1989) als Einflussbereichsfunktion (*footprint function*) bezeichnet. Im Folgenden wird der Einflussbereich mit dem ebenso geläufigen Begriff nach HORST & WEIL (1992) als Footprint bezeichnet. Der Footprint spiegelt die räumliche Gewichtung und Intensität eines Quellgebietes für eine bestimmte Messgröße wider (FOKEN 2006a: 84f). Diese Messgröße ist in dieser Arbeit der CO<sub>2</sub>-Fluss.

Es gibt viele Modelle zur Berechnung des Footprints. Die gängigen sind Diffusionsmodelle unter der Voraussetzung einer homogenen Oberfläche, der Höhenkonstanz des Flusses und advektiver Bewegungen. Wichtige Parameter zur korrekten Berechnung der jeweiligen Modelle beinhalten die Messhöhe, Rauigkeitslänge, Stabilität, Standardabweichung der lateralen Windkomponenten und die Windgeschwindigkeit. Die Validierung der Footprint-Modelle erfolgt über zwei mögliche Experimente: Die klassische direkte Variante nutzt Tracer-Gase, während die zweite indirekte Methode Störungen und Hindernisse im potenziellen Gebiet des Footprints nutzt, um integrale Turbulenzcharakteristika belegen zu können (FOKEN 2006a: 86).

Das erste Footprint-Modell geht auf PASQUILL (1972) zurück. In den 1990er und 2000er Jahren kamen immer mehr Modelle auf, die jeweils unterschiedliche Besonderheiten aufweisen (Vgl Tab. 2) (FOKEN 2006a: 86, FOKEN 2017: 106).

Die Footprints in dieser Arbeit wurden nach der Methode von KORMANN & MEIXNER (2001) berechnet. Diese Methode ist das einzige analytische Modell, das in der niedrigen Grenzschicht angewendet werden kann (FOKEN 2013: 112) und ist insgesamt eines der beliebteren analytischen Modelle (ARRIGA et al. 2017:78).

Als Basis dieses Footprintmodells dienen die Annahmen, dass homogene und stationäre Bedingungen über einer homogenen und isotropen Oberfläche herrschen, die Variabilität der Windgeschwindigkeit entlang der Achse der Hauptwindrichtung vernachlässigbar ist, ausschließlich Advektionsprozesse untersucht werden und der vertikale Turbulenztransport durch einen Diffusionsprozessgradienten vertreten wird (KNÖFEL 2016: 41f).

Tabelle 2: Auswahl nennenswerter Footprintmodelle mit jeweiligen Autoren und zugehörigen Bemerkungen  
(nach FOKEN 2006a: 86 und FOKEN 2017: 106)

Author/en	Bemerkungen
SCHEUPP ET AL. (1990)	Analytisches Footprintmodell; Nutzung von Quellgebieten mit neutraler Stratifikation und gemittelter Windgeschwindigkeit (1D)
LECLERC & THURTELL (1990)	Langrangesches Footprintmodell (1D)
HORST & WEIL (1992)	Analytisches Footprintmodell (1D)
SCHMID (1994)	Teilung des Footprints in Skalare und Flüsse (1D)
SCHMID (1997)	2D-Version von Horst und Weil (1992)
KAHARABATA ET AL. (1997)	Analytisches Footprintmodell (2D)
LECLERC ET AL. (1997)	LES-Modell für Footprint (1D)
BALDOCCHI (1997)	Langrangesches Footprintmodell innerhalb Wälder (2D)
RANNIK ET AL. (2000)	Langrangesches Footprintmodell für Wälder (2D)
HSIEH ET AL. (2002)	Analytisches Footprintmodell (1D)
KORMANN & MEIXNER (2001)	Analytisches Modell mit exponentiellen Windprofilen (1D)
KLJUN ET AL (2002)	Langrangesches Modell für diabatische Schichtungen, heterogene Oberflächen und Rückwärtstrajektorien (3D)
CAI UND LECLERC (2007)	Konzentrationsfootprint durch Vorwärts- und Rückwärtspartikelsimulationen anhand von LES-Daten (3D)
PRABHA ET AL. (2008)	Footprint innerhalb einen Kronendach mit LES (3D)
STEINFELD ET AL. (2008)	Footprintmodell mit LES-Partikeln (3D)

Der vertikale turbulente Fluss ( $F(0,0,z_m)$ ), der in einer bestimmten Höhe ( $z = z_m > 0$ ) über dem Ursprung des Koordinatensystems gemessen wurde, steht im Zusammenhang mit der Windrichtung des Oberflächenflusses ( $F(x,y,0)$ ) des Messpunktes. Dies wird mit der folgenden Formel beschrieben (KORMANN & MEIXNER 2001: 209):

$$F(0,0,z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} F(x,y,0) \phi(x,y,z_m) dx dy \quad (21)$$

Hier deutet  $x$  in die Richtung der mittleren horizontalen Windrichtung. Der Footprint des Stoffanteils an Punkt  $(0,0,z)$ , der von einer bestimmten Punktquelle  $(x,y,0)$  verursacht wird, wird durch  $(\phi(x,y,z_m))$  beschrieben (KORMANN & MEIXNER 2001: 209).

Dieser Footprint wird mit der folgenden Gleichung aufgeschlüsselt:

$$\phi(x,y,z) = D_y(x,y) \cdot f(x,z) \quad (22)$$

„Hierbei ist  $f(x,z)$  der windwärts ( $x > 0$ ), quer zum Wind integrierte Fluss, gemessen in einer Höhe  $z$  im Koordinatenursprung.  $D_y$  repräsentiert die normalverteilte Verteilungsfunktion quer zum Wind nach PASQUILL (1972) mit der als höhenunabhängig angenommen Dispersion  $\sigma = \sigma_y(x)$  quer zur Windrichtung“ (KNÖFEL 2016: 42):

$$D_y(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (23)$$

Anschließend werden Hilfsgrößen eingesetzt. Der sogenannte Formfaktor nach ULDEN (1978)

$$r = (2 + m - n) \quad (24)$$

mit  $m$  und  $n$  als Exponenten des Potenzgesetzes für die Eddy-Diffusivität

$$K(z) = \kappa^n \quad (25)$$

und der horizontalen Windgeschwindigkeit

$$u(z) = U z^m, \quad (26)$$

wobei  $U$  und  $\kappa$  Konstanten sind. Diese Gleichungen können nun zur Flusslängenskala zusammengefügt werden:

$$\xi = \xi(z) = \frac{U z'}{r^2 \kappa} \quad (27)$$

Der luvseitig, quer zum Wind integrierte Fluss kann wie folgt beschrieben werden (KNÖFEL 2016: 42):

$$f(x, z) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} e^{-\xi/x} \quad (28)$$

Hier wird die Gammafunktion  $\Gamma$  und die Konstante  $\mu = (1 + m)/r$  eingeführt. Hieraus ergibt sich letztendlich die Footprintfunktion nach KORMANN & MEIXNER (2001):

$$\phi = D_y \cdot f = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} e^{-\xi/x} \quad (29)$$

Um den maximalen Stofffluss ( $f_{max}$ ) an einer bestimmten Stelle ( $x_{max}$ ) quer zum Wind zu berechnen, berücksichtigt man für das Integral der quer zum Wind normalverteilten Verteilungsfunktion:

$$\int_{-\infty}^{\infty} D_y = 1 \quad (30)$$

Somit kann man die Gleichung (29) simplifizieren:

$$f_{max} = \frac{(1 + \mu)^{1+\mu}}{\Gamma(\mu)\xi} e^{-(1+\mu)} \quad (31)$$

Und an der Stelle:

$$x_{max} = \frac{\xi}{1 + \mu} \quad (32)$$

Es sollte berücksichtigt werden, dass der Footprint auf der X- und Y-Achse unendliche Ausmaße besitzt, sodass bei der Berechnung räumliche Limitierungen nötig sind (KNÖFEL 2016: 42f). Die Footprints in dieser Arbeit sind auf 1 km<sup>2</sup> limitiert mit dem Messpunkt im Zentrum.

Diese Daten wurden ebenso vom IBG-3 (Institut für Bio und Geowissenschaften: Agrosphäre) des Forschungszentrum Jülich berechnet und bereitgestellt.

## 2.6. Datenanalyse

Die Datenanalyse wurde mit der Programmiersprache Python 3.7. durchgeführt, die besonders in der Verarbeitung von Geodaten Anwendung findet. So ist diese Grundlage für GIS-Anwendungen, wie bspw. QGIS (QGIS Project 2019: 420). Darüber hinaus wurden die Programmierbibliotheken GDAL und pandas genutzt. GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) ist die Basis vieler Anwendungen in QGIS und auch in dem hier verwendeten Skript (Anhang A) wird es genutzt, um die vorhandenen Raster anzupassen und auszulesen. GDAL erlaubt es Rasterdaten in 100 unterschiedlichen Formaten zu lesen und selbst in 71 Formaten zu schreiben. Im Bereich der Vektordaten kann GDAL 42 Formate öffnen und 39 erstellen. Somit ist GDAL eine nützliche Programmierbibliothek für Geodaten (WESTRA 2015: 5f).

Zusätzlich wurde die Programmierbibliothek pandas (*panel data*) genutzt, welche über eine herausragenden Datenstruktur und Funktionalität verfügt und somit die Möglichkeit bietet, die Daten schnell, einfach und ausdrucksvoll in strukturierter oder tabellarischer Form darzustellen. Als Grundlage dienen bei pandas das DataFrame-Objekt und das Series-Objekt. Das DataFrame-Objekt ermöglicht eine Tabellenstruktur mit Spaltenorientierung, die ebenso Spalten und Zeilen beschriftet, während das Series-Objekt einen eindimensionalen Array darstellt. Hiermit verfügt pandas über eine hohe Leistung bei der Verarbeitung von Arrays und ermöglicht ebenso eine flexible Manipulation der Daten als auch eine Indexierung, welche die Veränderung der Ausmaße eines Datensatzes erlaubt (MCKINNEY 2017: 4).

Da die Rasterdaten unterschiedliche räumliche Auflösungen aufweisen und zudem die Pixelkanten nicht aneinander angepasst sind, müssen die Daten zuallererst angeglichen werden. Die Fluoreszenzkarte mit einer Pixelkantenlänge von 1 m wird daher erst auf 1 cm heruntergerechnet, wobei der Pixelwert des ursprünglichen Pixels in den neuen Pixeln übernommen wird. Dabei kann eine Dateigröße entstehen, die der Dateigröße eines GeoTiffs übersteigen kann, sodass hier eine VRT-Datei (*GDAL Virtual file*) zum Einsatz kommt, welche das Problem der Datengröße aufhebt. Anschließend werden die Pixel an die des Footprints (2 m Kantenlänge) angepasst. Hierbei werden die Fluoreszenzpixel innerhalb der Pixel des Footprints gemittelt, sodass die beiden Rasterdaten perfekt aufeinander angepasst sind. Ebenfalls werden die Daten, die über die Ausmaße des Footprints hinausgehen, gelöscht. Daraufhin werden die Rasterdaten eingelesen und mit den X- und Y-Koordinaten des Rasters in einem DataFrame gespeichert. Der GPP-Wert des jeweiligen Zeitpunktes und die Fluoreszenzwerte werden zudem mit den Pixelwerten des Footprints multipliziert, sodass eine Tabelle wie bspw. Tab. 3 entsteht. Anschließend werden die Daten der Pixel über den Footprint absteigend sortiert, sodass die Daten einfach zu unterschiedlichen prozentualen Anteilen am Footprintsignal sequenziert und

begutachtet werden können. Die Sequenzen sind aufgeteilt in 33%, 50%, 66%, 90%, 95% und 98% des Footprints. Am Ende der jeweiligen Sequenzen werden die GPP-Werte addiert und die der Fluoreszenz gemittelt. Die Sequenzierung erlaubt somit eine bessere Vergleichbarkeit der Daten, da die Footprints unterschiedliche prozentuale Anteile des Signals darstellen. Zudem kann so begutachtet werden, welche Nutzungsanteile des Footprints Aussagen über den Zusammenhang zwischen GPP und SIF zulassen. Die Korrelation zwischen GPP und SIF wird mit dem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ , Quadrat des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten) angegeben.

*Tabelle 3: Beispielhafter Aufbau des DataFrame zur Prozessierung der Daten.*

X	Y	Footprint [%/100]	Fluoreszenz [ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ ]	Footprint * GPP [ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]	Footprint * Fluoreszenz [ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ ]
256	262	0.00930872	0.70784253	0.18948829	0.00658911
257	262	0.00918726	0.65823138	0.18701588	0.00604734
255	261	0.00849714	0.80782938	0.17296769	0.00686424
256	260	0.00840608	0.93670869	0.17111415	0.00787405
255	262	0.00833037	0.82633328	0.16957311	0.00688367
257	260	0.00793626	0.81860107	0.16155045	0.00649663
256	263	0.00789171	0.57941401	0.16064374	0.00457257
255	260	0.00748461	0.84213263	0.15235671	0.00630303

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Ableitung der Chlorophyllfluoreszenz

Die SIF-Ableitung, die bei der Wellenlänge von 687 nm vorgenommen wurde, zeigt folgende Ergebnisse (Abb. 10). Der erste Überflug am 26. Juni zeigt, dass das Feld, in dem die nördliche Station (SE\_EC\_001) (Abb. 10(a)) steht, im Allgemeinen positive SIF-Werte zwischen 0 und  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  aufweisen. Die angrenzenden Flächen insbesondere im Norden und im Osten zeigen wesentlich geringere Werte, die sich größtenteils im negativen Wertebereich bewegen. Im Nordosten sind wiederum Flächen mit schwankenden Werten zu finden. Die Werte liegen zwar häufig zwischen 0 und  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , allerdings findet man öfter Werte, welche höher oder niedriger sind. Südlich und westlich angrenzend sieht man Flächen, die höhere Werte zeigen, welche über  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  liegen.

Das Feld, in dem sich die südliche Station (SE\_EC\_004) (Abb. 10(a)) befindet, weist grundsätzlich eher einen Wertebereich zwischen  $0,5$  und  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  auf. Die umliegenden Flächen im Norden und Osten zeigen eher niedrigere Werte unter  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Einzelne Felder weisen aber auch hier positive SIF-Werte auf. Eine ähnliche Chlorophyllfluoreszenz ist auch im Süden zu finden, während diese westlich der Station wieder positiv ausfallen.

Der zweite Überflug am 26. Juni weist im kompletten Ausschnitt niedrigere Werte auf als beim ersten Überflug des Tages (Abb. 10(b)). Die Fläche der nördlichen Station weist zwar noch immer größtenteils Werte bis  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  auf, jedoch sind hier nun auch vermehrt Werte unter  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  zu erkennen und keine über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Auch hier weisen die Flächen nördlich und östlich hauptsächlich Werte unter  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  auf. Die Felder im Nordosten zeigen Werte bis  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  mit vielerlei Bereichen unter  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Die Werte in den angrenzenden Feldern im Süden und Westen haben sich auch verringert, zeigen allerdings partiell immer noch höhere Werte über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Trotzdem liegen die meisten Werte zwischen 0 und  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ .

Innerhalb des Feldes, in dem die südliche Station steht, werden größtenteils höhere Werte über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  angezeigt, jedoch sind auch hier vermehrt niedrigere Werte zu erkennen im Vergleich zum ersten Überflug. Die östlich angrenzenden Flächen zeigen auch verringerte Werte, jedoch sind diese immer noch sehr schwankend. Hohe Werte über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  und auch niedrigere unter  $-0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  sind zu sehen, genauso wie im Süden. Die Flächen westlich der Station zeigen auch Reduzierungen von SIF an, liegen aber weiterhin zwischen 0 und  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ .

Die Daten vom 27. Juni (Abb. 10(c)) zeigen um die nördliche Station herum eine homogene Fläche mit Werten zwischen 0 und  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Nördlich und östlich sind auch hier größtenteils negative SIF-Werte zu sehen. Im Nordosten sind keine Werte über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  zu sehen, dort befinden sich einige Flächen mit Werten zwischen 0 und  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , sowie unter 0. Südlich und westlich der Station verringern sich die Werte im Vergleich zu den ersten beiden Überflügen. Die dortigen Flächen weisen inzwischen recht homogenen Werte zwischen 0 und  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  auf, im Westen gibt es jedoch vereinzelt höhere Werte.

Auch die Fläche um die südliche Station zeigt niedrigere Werte an als zuvor, die allerdings immer noch zwischen 0 und  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  liegen. Nördlich und westlich der Station sind größtenteils Flächen mit Werten unter 0 zu finden. Einzelne Flächen zeigen dort aber auch höhere Werte zwischen 0 und  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Südlich sind die Flächen mit erhöhten Werten bis  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  und niedrigeren Werten unter  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  ausgeglichen. Westlich der Station liegen die Werte hauptsächlich zwischen 0 und  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  mit einem großen Anteil höherer Werte.

Die Daten vom ersten Überflug am 29. Juni (Abb. 10(d)) zeigen eine verstärkte Heterogenität um die nördliche Station. Hier ist vor allem zu erkennen, dass innerhalb des Feldes ein Ost-West-Gefälle vorhanden ist mit negativen Werten im Westen und Werten über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  im Osten. Östlich und nördlich angrenzend befinden sich noch immer hauptsächlich Felder mit mehrheitlichen Werten unter  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Im Osten sind jedoch auch kleinere Bereiche mit höheren SIF-Werten zu erkennen. Im Nordosten ist wieder ein heterogenes Gebiet zu sehen. Dort sind einzelne Felder zu sehen mit Werten unter 0, als auch Flächen bis 0,5 und über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Das westlich angrenzende Feld zeigt ebenfalls ein heterogenes Verhalten auf, welches im Westen und Norden des Feldes höhere Werte über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  aufweist und im Süden negativ ausfällt. Das südlich angrenzende Feld zeigt auch wieder verstärkt höhere Werte über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , größtenteils liegen die Werte hier aber zwischen 0 und  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ .

Die Fläche der südlichen Station stellt sich homogen dar mit Werten über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Nördlich dieser Fläche sieht man Bereiche mit unterschiedlichen SIF-Werten, die sich entweder im negativen Wertebereich befinden oder über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  liegen. Östlich zeigen sich Flächen hauptsächlich negative SIF an. So auch im Süden, wo allerdings auch einzelne Felder zu finden sind, die positive Werte aufweisen. Westlich der Station erkennt man Flächen, die eher Werte über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  zeigen.

Der zweite Überflug von 29. Juni (Abb. 10(e)) zeigt ähnliche Strukturen. Das Gefälle innerhalb der nördlichen Station ist immer noch erkennbar. Im Norden sind hier weiterhin Flächen mit

tendenziell negativen Werten zu sehen. Im Nordosten sind sowohl Flächen mit positiven Werten bis  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  zu sehen als auch Fläche mit negativen Werten. Im Osten sind weiterhin eher Flächen mit negativen Werten zu finden. Allerdings findet man auch hier – wie schon beim ersten Überflug – einige Gebiete mit höheren Werten über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Im Süden sind die einzelnen Flächen ebenfalls unterschiedlich geprägt. Die Schwankungen liegen hier bei einer negativen Fluoreszenz bis zu Werten über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Die östlichen Flächen zeigen wieder positive SIF-Werte, die größtenteils unter  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  liegen. Der letzte Überflug vom 2. August (Abb. 10(f)) zeichnet ein komplett anderes Bild im Vergleich zu den vorherigen Überflügen. Das Feld der nördlichen Station zeigt verstärkt negative Fluoreszenz an und auch die Flächen angrenzend zeigen hauptsächlich negative Werte. Nur wenige Flächen nördlich und nordöstlich zeigen noch positive Werte. Im Gegenteil dazu zeigt das Feld der südlichen Station homogene Werte über  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . So sieht auch das im Westen angrenzende Feld aus. Die Werte der umliegenden Flächen weisen jedoch auch hier einen negativen Wertebereich.

Die Ableitung von SIF bei einer Wellenlänge von 760 nm zeigt folgende Ergebnisse an (Abb. 11). Der Wertebereich befindet sich hier zwischen knapp unter 0 bis ca.  $5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Die Daten des ersten Überfluges (Abb. 11(a)) zeigen um die nördliche Station geringe Werte zwischen 0 und  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  an. Nördlich und östlich finden sich mehrere Felder mit negativen Werten. Vereinzelt zeigen Felder im Nordosten positive Werte bis  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Ein Feld im Norden weist auch Werte von  $2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  auf. Westlich finden sich hier Flächen, die eher positive Werte zeigen gemeinsam mit kleineren Bereichen, die negative Werte aufweisen. Das südlich angrenzende Feld besitzt wiederum klar positive Werte bis 2, teilweise auch bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Auch das Feld der südlichen Station zeigt diese Werte auf. Nördlich und Östlich dieser Station finden sich jedoch wieder Flächen mit niedrigen Werten von unter 0 bis  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Kleinere Flächen im Norden zeigen aber auch hier positive Werte. Die westlich anrainende Fläche besitzt die wohl höchsten Werte dieser Aufnahme mit Werten bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Diese Werte sind in kleineren Bereichen auch im Süden zu finden, wo allerdings auch Felder mit niedrigeren Werten unter  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  zu finden sind.

Im Verlauf des Tages zeigt der zweite Überflug am 26. Juni (Abb. 11(a)) tendenziell geringfügig höhere Werte. Die Fläche, in der sich die nördliche Station befindet, weist weiterhin Werte bis  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  auf. In den Randbereichen des Feldes zeigen sich nun allerdings auch Werte bis  $2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Im Norden und Osten ist sind die Ergebnisse vergleichbar mit dem ersten Überflug. Hier werden auch Werte zwischen 1 und unter  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  dargestellt.

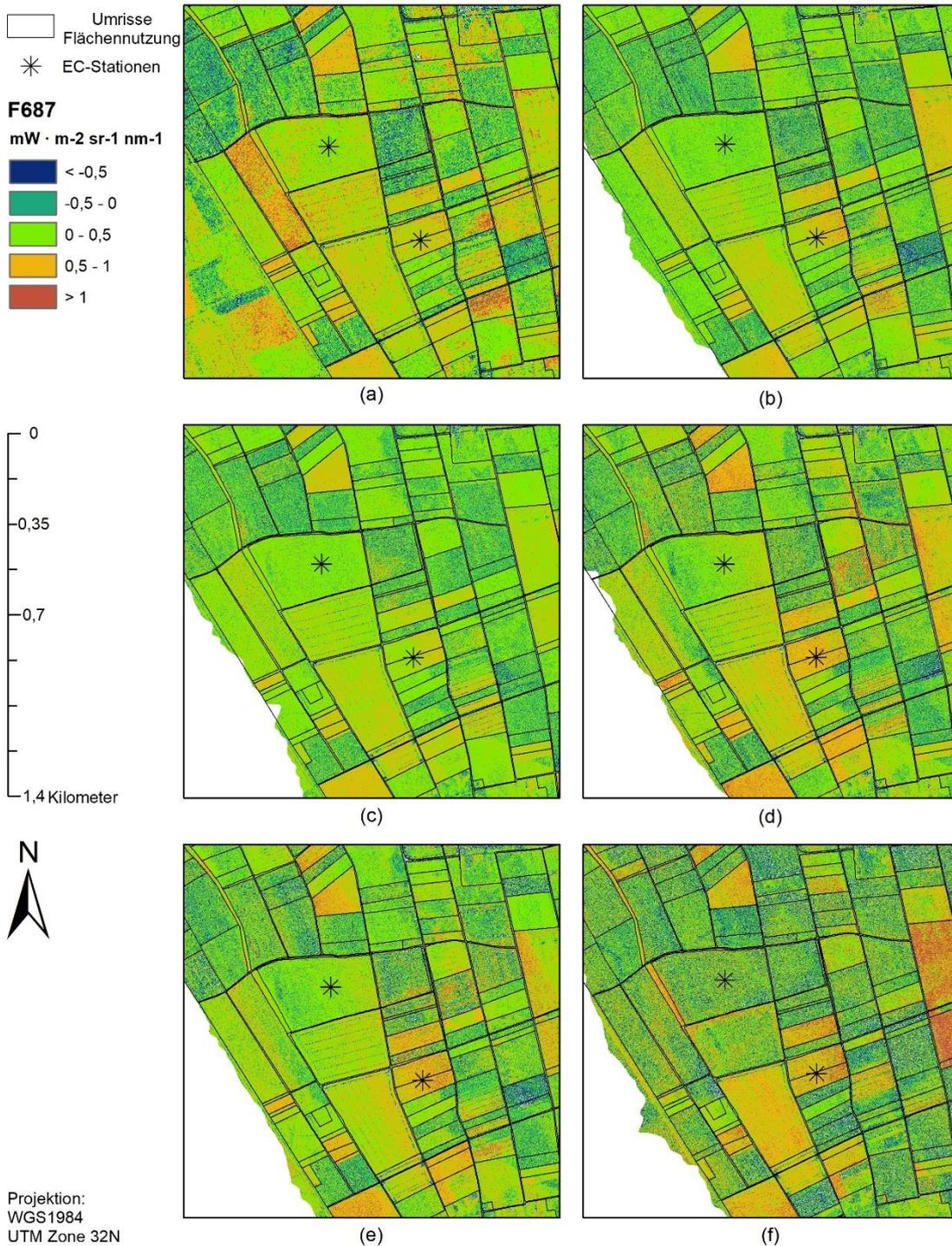


Abbildung 10: Darstellung der Ableitungsergebnisse von  $F_{687}$  für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

Ein ähnliches Bild zeigen auch die Fläche westlich der Station. Das südlich liegende Feld zeigt weiterhin höhere Werte an, die zu diesem Zeitpunkt auch in einem größeren Bereich bis zu  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  erreichen. Auch das Feld der südlichen Station weist diese Werte auf. Westliche dieser Station zeigen sich hingegen wieder niedrigere Werte, die unter 0 liegen, teilweise auch bis  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Im Norden zeigen sich einzelne Felder mit höheren Werten, die bis  $4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  reichen. Allerdings befinden sich nördlich auch mehrere Felder mit Werten unter  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Südlich der Station sieht man ähnliche Gegebenheiten, die viele Felder mit niedrigen Werten bis 1 aufweisen. Einzelne Felder zeigen allerdings auch höhere Werte bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Westlich der Station zeigt das Feld auch hier hohe Werte, die zu diesem Zeitpunkt bis  $4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  aufweisen und somit – wie zu dem vorherigen Überflug - das Feld mit den höchsten Werten darstellt.

Der darauffolgende Tag (27. Juni, Abb. 11(c)) zeigt wieder ähnliche Ergebnisse im Vergleich zum Vortag. Die Fläche der nördlichen Station zeigt homogen einen Wert zwischen 0 und  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , während die umliegenden Felder im Norden und Osten eher Werte unter 0 angeben. Einzelne Felder im Nordosten zeigen Werte bis 1 und ein Feld im Norden weist einen Wert bis 3 auf. Westlich der Station besitzen die Felder Werte zwischen 1 und  $2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , die allerdings auch in kleineren Bereichen niedriger liegen können (unter 0). Das südlich angrenzende Feld zeigt auch hier wieder höhere Werte, die in einzelnen Bereichen des Feldes bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  reichen können.

Das Feld, in der die südliche Station steht, zeigt wieder erhöhte Werte bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  an. Wie auch am Vortag sieht man im Norden und Osten Felder niedrigere Werte, die größtenteils unterhalb von  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  liegen. Einzelne Felder weisen dort auch Werte, die bis 1 oder auch bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  reichen, auf. Südlich zeigen die Felder jedoch wieder niedrigere Werte zwischen unter 0 und 1 an. Das westliche Feld weist wieder klar höhere Werte bis  $4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  auf.

Die Daten des ersten Überflugs des 29. Juni (Abb. 11(d)) zeigen in vielerlei Gebieten der Aufnahme kaum Veränderungen zu den vorherigen Überflügen. Das Feld der nördlichen Station zeigt weiterhin Werte zwischen 0 und 1. Nördlich und östlich zeigen die Felder größtenteils negative Werte an, allerdings steigt im Osten die Anzahl der leicht positiven Werten an. Der Nordosten präsentiert sich hier ähnlich mit vielen Gebieten, die leicht über 0 liegen und mit Werten unter 0. Ein einzelnes Feld im Norden, das in den vorherigen Überflügen höhere Werte aufwies, zeigt auch hier Wert bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ . Im Westen weisen die Felder Werte auf, die unter 0 liegen als auch bis  $2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  reichen können. Südlich der Station zeigt das angrenzende Feld wieder höhere Werte bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ .

Die Südliche Station befindet sich auch wieder innerhalb eines Feldes, das Werte bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  anzeigt. Daran östlich angrenzend zeigen sich Felder mit negativen Werten mit Bereichen, die auch bis 1 reichen. Nördlich zeigt sich ein heterogeneres Bild mit einzelnen Feldern, die negative Werte besitzen als auch Feldern mit positiven Werten, die zum Teil bis  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  und auch bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  angeben. Kleine Bereiche zeigen hier auch Werte bis  $5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Südlich der Station zeigen sich zahlreiche Felder mit Werten unterhalb von  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ , allerdings reichen auch hier einige bis 1. Weiter südlich befinden sich wiederum Felder, die höhere Werte aufweisen und bis zu  $5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  annehmen. Dieser Werte werden besonders häufig am westlich angrenzenden Feld ersichtlich. Der spätere Überflug des 29. Juni (Abb. 11(e)) zeigt wiederum eine allgemeine Reduzierung der Strahlungsintensität. So weist das Feld der nördlichen Station zwar noch immer Werte zwischen 0 und  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  auf, jedoch zeigen sich mehrere kleinere Bereiche, die unter 0 liegen. Die nördlich und westlich liegenden Felder zeigen weiterhin einen Wertebereich von unter 0 bis  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ , auch das Feld im Norden, das zuvor höhere Werte aufwies, hat einen Verlust der Strahlungsintensität zu verzeichnen, die hier zwischen 1 und  $2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  liegt. Auch im Westen zeigen die Felder Werte, die nur in kleinen Bereichen über 1 hinausgehen. Südlich angrenzend zeigt das Feld Werte bis 2, z.T. noch bis  $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ .

Um die südliche Station herum zeigen sich Werte zwischen 1 und  $2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Nördlich, östlich und südlich sieht man hauptsächlich Felder mit niedrigen Werten zwischen 1 und unter  $0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Einzelne Felder, die auch schon vorher erhöhte Werte aufweisen, zeigen auch jetzt noch Werte bis  $2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Das westlich angrenzende Feld zeigt hier im Gegensatz zu den meisten anderen Feldern höhere Werte die bis zu  $4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  reichen. Am letzten Überflug (2. August, Abb. 11(f)) zeigt sich in vielen Gebieten der Aufnahme ein homogenes Bild. Die Strahlungsintensität hat merklich abgenommen. Nahezu alle Felder um die nördliche Station zeigen Werte, die entweder unter 0 liegen oder maximal bis  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  reichen, was ebenso für das Feld zutrifft, in dem die Station steht. Das Feld der südlichen Station zeigt noch erhöhte Werte bis  $2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Allerdings sieht man auch hier bei fast allen Flächen Werte bis maximal  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Einzelne Flächen im Norden und im Osten weisen allerdings noch immer Werte bis 2 auf. Das Feld westlich der Station zeigt auch zu diesem Zeitpunkt teilweise bis  $4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ , die Strahlungsintensität hat aber auch hier abgenommen.

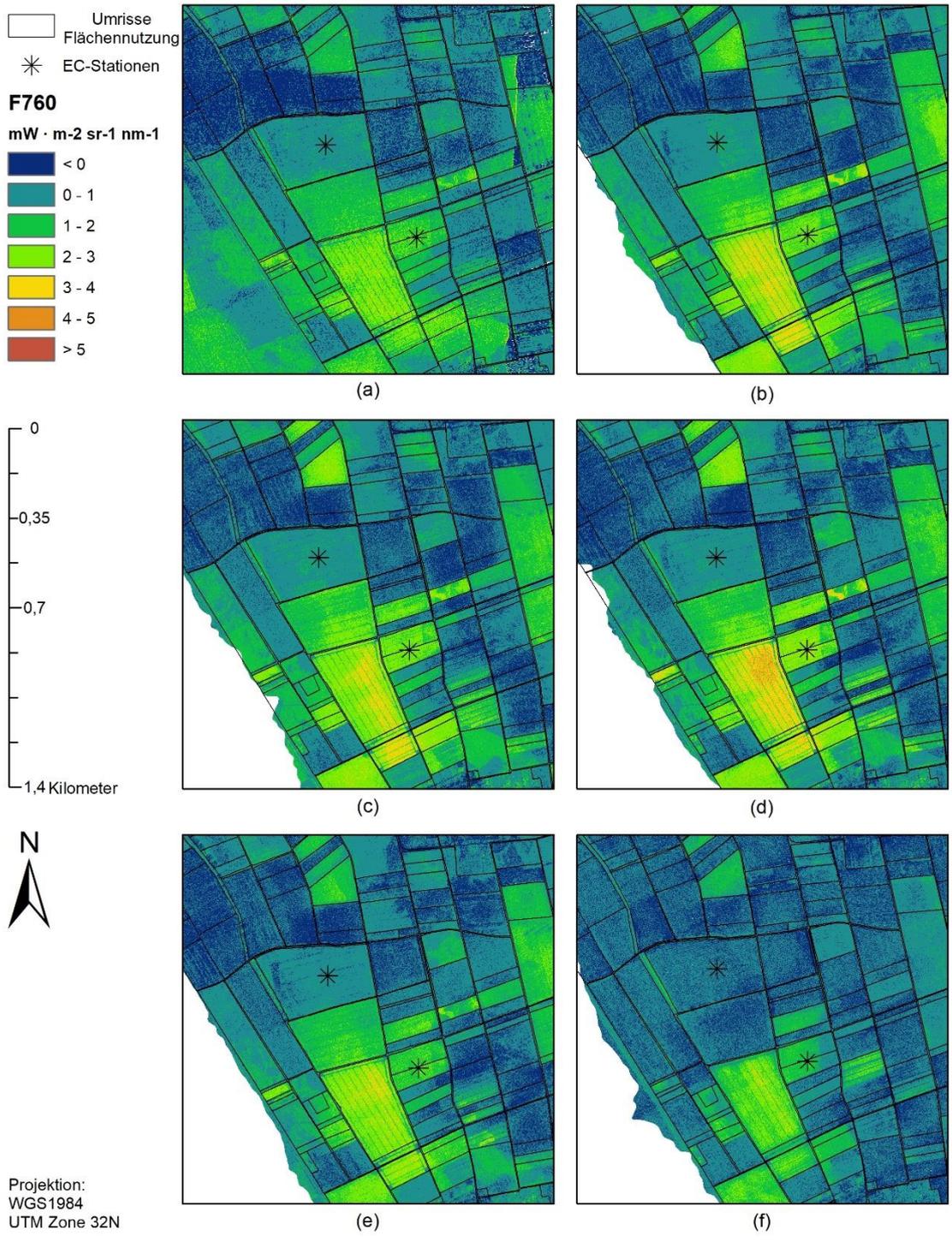


Abbildung 11: Darstellung der Ableitungsergebnisse von  $F_{760}$  für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

Die totale Fluoreszenz, die das Integral über das komplette Fluoreszenzspektrum widerspiegelt, wird in Abb. 12 dargestellt. Hier zeigt die Strahlungsintensität einen Wertebereich von unter 0 bis  $500 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Das Feld der nördlichen Station zeigt zum Zeitpunkt des ersten Überflugs am 26. Juni (Abb. 12(a)) Werte zwischen 0 und  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  an. Die Fläche nördlich und östlich weisen größtenteils negative Werte auf, während im Nordosten wiederum mehrere Felder Werte bis 100 angeben. Im Norden befinden sich zwei Flächen, welche höhere Werte bis  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  wiedergeben. Westlich der Station zeigen sich ebenfalls positive Werte, die in einzelnen Bereichen ebenfalls bei  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  ansteigen. Diese Werte sind ebenso in dem Feld südlich der Station erkennbar.

Auch die Fläche um die südliche Station zeigt hohe Werte bis zwischen 100 und  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ , die ebenso in einzelnen Feldern nördlich vorzufinden sind. Dort sind jedoch auch einige Flächen mit negativen Werten zu sehen. Östlich der Station zeigen die Felder wieder geringe positive Werte bis  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ , die allerdings auch in einzelnen Bereichen negativ ausfallen. Im Süden zeigen sich grundlegend positive Werte, die bis zu  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  ansteigen. Diese Werte sind ebenfalls westlich der Station zu erkennen.

Die Daten des zweiten Überflugs des 26. Junis (Abb. 12(b)) zeigen weiterhin um die nördliche Station eine niedrige Strahlungsintensität, die sich bis maximal  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  bewegt. Auch im Norden und Osten sind keine Veränderungen zu sehen. Hier zeigt sich ein Großteil der Fläche noch immer mit negativen Werten. Einzelne Flächen im Nordosten zeigen Werte bis 100 als auch bis  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Im Norden zeigt ein einzelnes Feld auch Werte bis  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Im Westen zeigen die Felder ebenfalls positive Werte, die hauptsächlich zwischen 0 und  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  liegen, aber auch bis  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  reichen. Auch das südlich angrenzende Feld zeigt Werte bis  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  mit einzelnen kleinen Ausschlägen bis zu  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Die Flächen um die südliche Station zeigt auch hier erhöhte Werte, die zwischen 100 und  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  liegen. Nördlich der Station findet man Felder, welche diese Werte ebenfalls zeigen. Allerdings befinden sich auch im Norden einige Felder, die negative Werte aufweisen. Östlich der Station zeigen sich ebenfalls Bereiche, die negative Werte aufweisen, jedoch auch positive Werte bis  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Im Süden zeigt sich ein heterogeneres Bild mit einzelnen Flächen mit geringer Strahlung bis  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Hier zeigen sich allerdings auch kleinere Flächen mit negativen Werten, als auch Flächen mit höheren Werten, die bis zu  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  reichen. Diese erhöhten Werte findet man auch am westlich angrenzenden Feld, das zum Teil noch Werte bis  $400 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  aufweist.

Am 27. Juni (Abb. 12(c)) zeigen die Daten um die nördliche Station noch immer Werte bis  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  und auch die umliegenden Felder im Norden und Osten zeigen wie zuvor negative Werte. Im Nordosten sieht man auch ein ähnliches Muster, wie zu den vorherigen

Flügen mit zum Teil negativen als auch schwach positiven Werten. Im Norden zeigt sich auch hier ein Feld mit höheren Werten bis  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Die Felder westlich der Station weisen positive Wert auf, die bis  $100$  als auch  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  reichen. Das südlich angrenzende Feld zeigt Werte die größtenteils bei  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  liegen, aber auch bis  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  ansteigen.

Das Feld der südlichen Station zeigt Werte, die bis  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  reichen. Diese Werte sind sowohl im Norden in einzelnen Feldern zu finden als auch im Süden. Die meisten Felder im Norden, Osten und Westen zeigen hingegen schwache Werte bis  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  und teilweise auch negative Werte. Westlich anrainend findet sich immer noch ein Feld, das höhere Werte aufweist, welche bis zu  $400 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  abgeben.

Der erste Überflug am 29. Juni (Abb. 12(d)) zeigt um die nördliche Station weiterhin schwach Werte, die höchsten  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  zeigen. Nördlich und östlich angrenzend finden sich weiterhin Felder negativer Werte. In einzelnen Bereichen im Osten sieht man nun jedoch schwach positive Werte und in kleinen Gebieten können diese bis  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  ansteigen. Im Nordosten finden sich weiterhin Felder, die geringe Werte anzeigen. Im Norden findet sich noch immer ein einzelnes Feld, das Werte bis  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  aufweist. Im Westen sind die Werte schwach positiv, können aber auch bis zu  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  angeben. Das südliche Feld zeigt ebenfalls Werte bis  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  und  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ .

Die südliche Station umgibt ein Feld, das eine Strahlungsintensität bis  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  angibt. Nördlich zeigen sich Felder mit ähnlichen Werten, die zum Teil auch Werte bis  $400 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  aufweisen. Weitere Felder im Norden zeigen allerdings wieder eher negative Werte an. Im Osten liegen die Werte eher im schwach-positiven Bereich mit teilweise negativen Werten. Südlich ist wieder ein heterogenes Bild zu sehen mit einigen Feldern, die negative als auch leicht positive Werte angeben. Einzelne Felder zeigen auch Werte bis  $200$  und  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Im Westen zeigt die Fläche weiterhin höhere Werte bis  $400 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ .

Im Vergleich zum ersten Überflug vermittelt der zweite Überflug vom 29. Juni (Abb. 12(e)) den Eindruck reduzierter Werte. Das Feld der nördlichen Station zeigt weiterhin schwache Werte bis  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  und auch die umliegenden Flächen im Norden, Osten und Westen zeigen entweder ähnliche oder negative Werte. Im Norden zeigt auch weiterhin ein Feld höhere Werte, die hier allerdings nur bis  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  reichen. Diese Werte zeigt auch das südlich anrainende Feld. Das Feld, in der die südliche Station steht, zeigt im Vergleich zum vorherigen Überflug niedrigere Werte bis zu  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Ähnlich gestalten sich einzelne Flächen nördlich der Station, jedoch zeigt sich das nördliche Gebiet eher mit niedrigeren oder negativen Werten. Östlich der Station zeigen sich ebenso eher negative oder schwache Werte bis  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ .

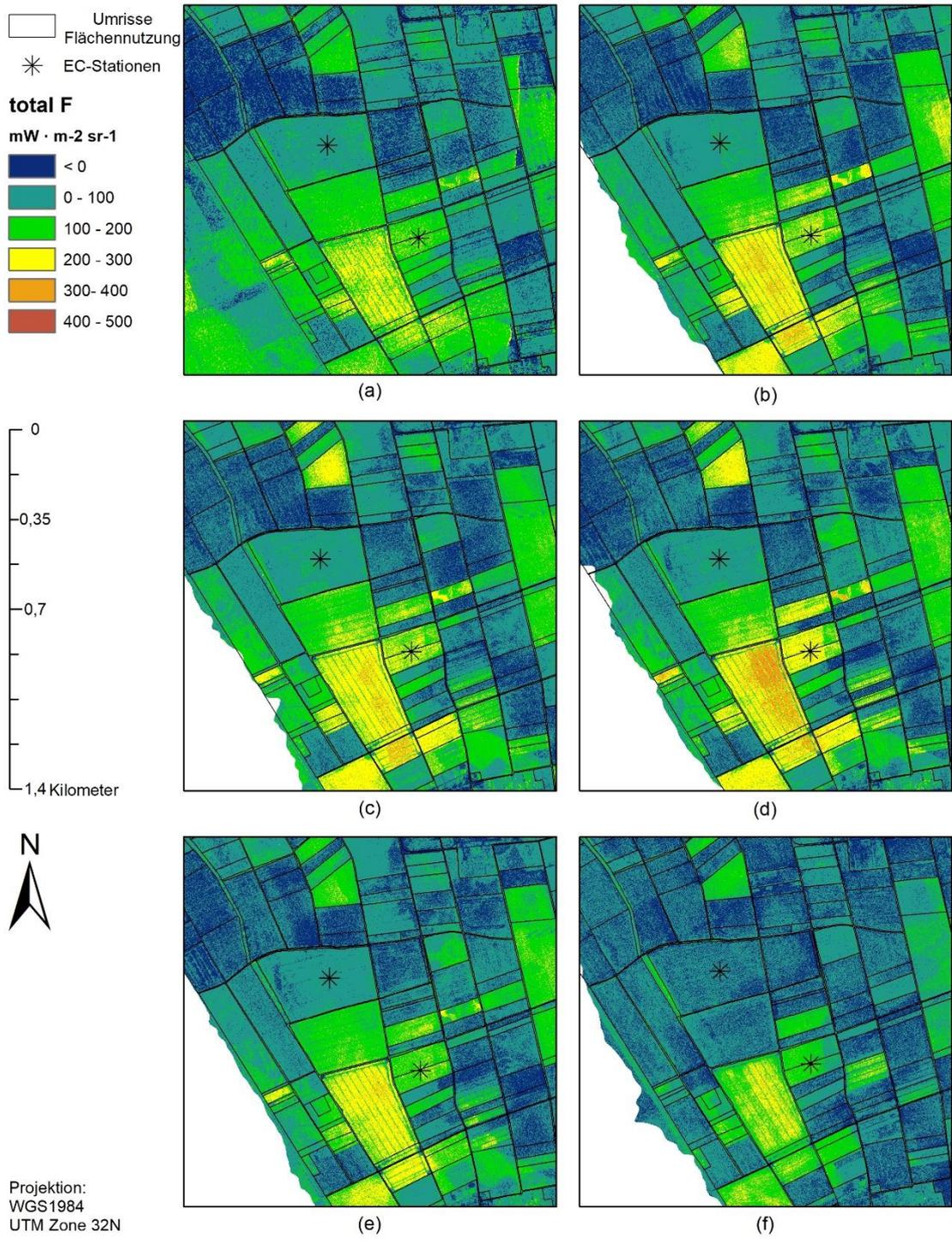


Abbildung 12: Darstellung der Ergebnisse der totalen Fluoreszenz ( $F_{tot}$ ) für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

Westlich angrenzend zeigt sich weiterhin das Feld mit höheren Werten, die sich zu diesem Zeitpunkt kaum höher als  $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  darstellen.

Der letzte Überflug am 2. August (Abb. 12(f)) zeigt eine allgemeine Reduzierung der Strahlungsintensität. Die Werte liegen in fast allen Gebieten im negativen Wertebereich oder nur schwachen Bereich bis zu  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Einzelne Flächen, wie beispielsweise im Norden oder auch das Feld der südlichen Station weisen Werte über  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  auf. Im Süden sind generell noch mehrere Flächen mit höheren Werten zu finden. So erkennt man einzelne Flächen um die südliche Station mit Werten, die zum Teil auch bis zu  $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  erreichen. Aber auch hier besitzt der Großteil der Flächen niedrige Werte, die unter  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  liegen.

Die Abbildung 13 zeigt das Verhältnis zwischen  $F_{687}$  und  $F_{760}$ , wo der Wertebereich über 21 liegt. Der erste Überflug am 26. Juni (Abb. 13(a)) zeigt hier um die nördliche Station hauptsächlich Werte zwischen 3 und 6, teilweise auch unter 3. Nördlich und östlich der Station zeigen sich geringe Werte unter 3. Nur in einzelnen Gebieten zeigen sich höhere Werte, zum Teil auch bis zu einem Wert von 12. Westlich der Station zeigt sich ein kleines Feld mit erhöhten Werten bis 12, westlich weitergehend liegen die Werte wieder geringer, die bis maximal 6 ansteigen. Im Süden der Station weist das Feld Werte auf, die zwischen 3 und 9 liegen.

Das Feld der südlichen Station gibt höhere Werte bis 12 wieder. Östlich der Station zeigen sich Felder niedriger Werte bis maximal 3. Diese sind auch häufig im Norden zu finden, wo sich allerdings auch einzelne Felder mit höheren Werten zeigen, die in einem kleinen Feld auch bis zu 16 ansteigen. Südlich der Station zeigen sich wiederum wieder größtenteils geringe Werte, die sich jedoch auch hier in einem Gebiet bis auf 12 erhöhen. Westlich der Station besitzt die Fläche Werte bis 12.

Zum späteren Zeitpunkt des 26. Juni (Abb. 13(b)) stellen sich die Daten folgendermaßen dar: Das Feld der nördlichen Station zeigt weiterhin größtenteils Werte zwischen 3 und 6. Hier sind allerdings auch einzelne negative und positive Ausreißer zu erkennen. Nördlich und Östlich der Station befinden sich weiterhin Felder, die Werte bis höchstens 3 besitzen. Ebenso gibt es auch hier ein paar Felder, die höhere Werte bis 12 angeben. Westlich befindet sich auch hier ein schmales Feld mit Werten, die ebenfalls bis 12 reichen. Dahinter zeigen sich dann wieder Felder mit Werten, die zwischen 0 und 6 liegen. Südlich der Station haben sich die Werte teilweise bis auf 12 gesteigert.

Das Feld, in dem die südliche Station steht, zeigt hier eher ein heterogenes Verhalten. Innerhalb des Feldes gibt es Werte, die zwischen 3 und 15 liegen. Auch ein Feld nordöstlich der Station zeigt ein stark heterogenes Verhalten an, in dem Werte zwischen 3 und 18 zu sehen sind. Die restlichen Felder in Norden und Osten der Station zeigen geringere Werte an, die häufig

niedriger als 3 sind. Jedoch können die Werte in einzelnen kleinen Gebieten auch höher liegen. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch im Süden der Station, wo viele Felder mit geringen Werten zu finden sind, allerdings mit einem Ausreißer, der auch Werte bis 15 anzeigt. Westlich der Station beinhaltet das Feld größtenteils Werte bis 15.

Die Daten vom 27. Juni (Abb. 13(c)) zeigen in dem Feld der nördlichen Station weiterhin größtenteils Werte bis 6, während die umliegenden Felder im Norden und Osten Werte bis 3 angeben. Auch hier zeigen Einzelne Felder in diesen Gebieten höhere Werte. Besonders im Norden zeigt ein Feld Werte bis 18. Im Westen sieht man weiterhin einen Streifen höherer Werte bis 15, die Felder weiter westlich hingegen zeigen hier Werte bis 3 bzw. 6 an. Südlich der Station weist das Feld starke Heterogenität auf, indem hier Werte zwischen 3 und 12 zu finden sind.

Das Feld der südlichen Station weist hier ebenso ein heterogenes Aussehen auf. Hier sind vielerlei Werte zwischen 3 und 18 zu sehen, die auch in einem kleinen Feld nordöstlich der Station angezeigt werden. So zeigen sich im Norden wieder einzelne Felder mit höheren Werten, wobei das Gros der Felder Werte unterhalb von 3 angibt. Auch westlich der Station zeigen sich geringe Werte. Südlich sieht es wiederum heterogener aus, wo einzelne Felder unter 3 liegen, andere Felder Werte bis 12 angeben und weitere Felder auf 18 ansteigen. Diese hohen Werte sind auch in dem Feld westlich der Station zu finden.

Am ersten Überflug des 29. Juni (Abb. 13(d)) zeigen sich innerhalb des Feldes der nördlichen Station vermehrt niedrigere Werte bis 3, wobei vermutlich ähnlich viele Werte bis 6 zu sehen sind. Nördlich und östlich zeigen sich auch hier eher niedrigere Werte bis 3, die in einzelnen Bereichen auch bis 12 und in einem Feld im Norden bis 18 ansteigen. Im Westen zeigt sich ein Feld wieder mit höheren Werten bis 15, die beiden weiteren Felder zeigen jedoch wieder niedrigere Werte bis maximal 6. Südlich zeigt das Feld wieder stärkere Schwankungen, die in einem Wertebereich zwischen 6 und 15 liegen.

Im Feld, in dem sich die südliche Station befindet, ist wieder ein heterogenes Verhalten zu beobachten, wo sich Werte zwischen 3 und 18 befinden. Im Nordosten zeigt sich ein einzelnes Feld, das Werte über 21 wiedergibt. Weitere Felder im Norden und Osten zeigen erhöhte Werte bis 15, jedoch weisen die meisten Felder dort niedrigere Werte bis 3 auf. Auch südlich der Station sind Werte bis 3 dominant. Hier zeigen sich dazu noch Felder mit Werten bis 12 als auch 18, welche in dem Feld westlich der Station ersichtlich sind.

Der zweite Überflug des 29. Juni (Abb. 13(e)) zeigt in dem Feld der nördlichen Station wieder Werte zwischen 0 und 6. Die umliegenden Flächen im Norden und Osten weisen größtenteils Werte bis 3 auf, einzelne Felder zeigen allerdings wieder höhere Werte, die 12 nicht übersteigen. Westlich erkennt man weiterhin einen Streifen mit höheren Werten, die bis 18 reichen. Die

dahinter folgenden Felder zeigen wiederum niedrigere Werte bis maximal 6. Südlich der Station weist das Feld Werte zwischen 3 und 15 auf.

Das Feld der südlichen Station zeigt auch hier starke Schwankungen zwischen 3 und 18. Nördlich der Station sieht man wieder einzelne Flächen höherer Werte, die zu dem Zeitpunkt über 21 liegen können. Die meisten Felder nördlich und östlich der Station zeigen allerdings wieder niedrigere Werte bis 3. Südlich der Station sieht man vereinzelt Felder, die über Werte von 3 hinausgehen und auch bis 15 reichen können, jedoch weisen die meisten niedrigere Werte als 3 auf. Das westlich gelegene Feld zeigt wieder höhere Werte, die in kleinen Bereichen bis 21 aufweisen, allerdings größtenteils zwischen 15 und 18 liegen.

Die Daten des letzten Überfluges am 2. August (Abb. 13(f)) weisen fast ausschließlich niedrige Werte zwischen 0 und 3 auf. Diese sind auch in dem Feld der nördlichen Station vorherrschend. Einzelne Flächen im Norden und Süden weisen noch höhere Werte als 3 auf. So zum Beispiel das Feld der südlichen Station, das zum Teil noch Werte bis 9 angibt. Dieses Bild geben auch einzelne Felder nördlich östlich und südlich der Station an. Das westlich angrenzende Feld zeigt noch immer hohe Werte, die in kleinen Bereichen bis 18 reichen, jedoch auch Werte ab 9 aufweist.

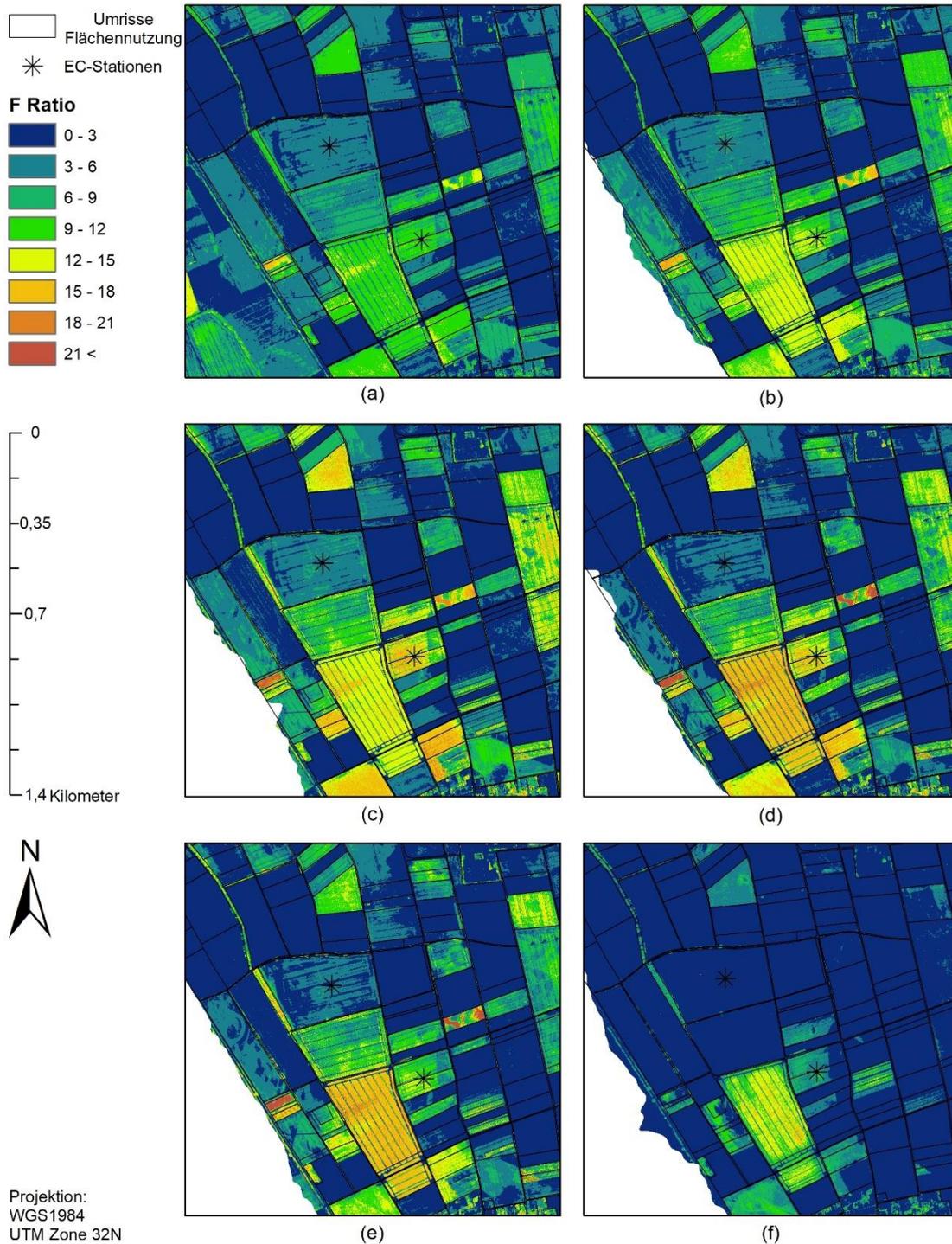


Abbildung 13: Darstellung der Ergebnisse für das Verhältnis ( $F_{Ratio}$ ) der Ableitungen  $F_{687}$  und  $F_{760}$  für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

### 3.2. FloX-Daten

Mithilfe der FloX wurde SIF innerhalb der beiden Wasserstoffabsorptionsbänder abgeleitet. Abbildung 14 zeigt die vorhandenen Werte von F687 an der nördlichen Station innerhalb des Weizenfeldes. So zeigt Abbildung 14(a), die den Überflugstag des 26. Juni beschreibt, einen Wertebereich zwischen ca. 0,1 und 1,4  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  an, wobei der Tagesverlauf in den Morgenstunden noch zwischen 0,1 und 0,3  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  pendelt und ab ca. 9 Uhr rapide ansteigt mit einzelnen Werten, die schon zu dem Zeitpunkt bis 1,4  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  reichen. Daraufhin fallen die Werte um 10 Uhr bis auf ca. 0,7  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  ab und steigen anschließend zur Mittagszeit wieder auf 1,4  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Von da aus fallen die Werte wieder bis sie um 16 Uhr ca. 0,7  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  aufweisen. Während des ersten Überfluges liegen die Werte ca. zwischen 0,9 und 1  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Für den zweiten Überflug liegen keine Daten vor.

Der 27. Juni (Abb. 14(b)) weist ebenfalls einen Wertebereich zwischen 0,1 und 1,4  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  auf. Hier steigen die Werte schon früh am Morgen auf ca. 0,6  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  an, wo sie sich ungefähr bis 8 Uhr halten. Anschließend steigen die Werte bis 10 Uhr auf einen Wertebereich zwischen 1 und 1,4  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  an. Daraufhin fallen die Werte wieder bis zum Mittag auf ca. 0,8. Um ca. 14 Uhr ist eine starke Streuung der Werte zu erkennen, die zwischen 1 und 0,2  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  liegt. Während des Überfluges um 11 Uhr liegen die Werte zwischen 0,8 und 1,4  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ .

Der Überflugstag des 29. Juni (Abb. 14(c)) zeigt einen Wertebereich zwischen 0,3 und 1,4  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  auf. Der Tagesverlauf startet um 8 Uhr bei einem Wert von 0,9  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ , der bis 10 Uhr bei stärkerer Streuung gehalten wird. Anschließend fallen die Werte bis 15 Uhr auf einen Wert von etwa 0,5  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Für den zweiten Überflug liegen keine Daten vor, während der erste Überflug zwischen 0,4 und 1  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  anzeigt.

Die Tagesverläufe für F760 werden in Abbildung 15 dargestellt. Für den ersten Überflugstag (Abb. 15(a)) weisen die Daten einen Wertebereich zwischen 0,1 und 1,1  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  auf. Der Tagesverlauf beginnt um ca. 6 Uhr mit einem Wert von 0,1  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ , der ungefähr bis 9 Uhr gehalten wird. Anschließend steigen die Werte ebenfalls rapide bis 1,1  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  an und stabilisieren sich anschließend zwischen 0,8 und 0,5  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Für den zweiten Überflug liegen auch hier keine Daten vor. Der erste Überflug zeigt einen Wertebereich zwischen 0,4 und 0,6  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  an.

Am 27. Juni (Abb. 15(b)) liegt der Wertebereich zwischen -0,1 und 0,7  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Morgens liegen die Werte bei 0,1 und steigen schnell an bis die Werte um 10 Uhr zwischen 0,6 und 0,5  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  liegen. Daraufhin fallen die Werte wieder ab und liegen um 14 Uhr

bei ca.  $0,1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Bis 15 Uhr ist hier eine starke Streuung zwischen  $0,4$  und  $0,1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  zu erkennen. Während des Überfluges liegen die Werte zwischen  $0,6$  und  $0,4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ .

Während des dritten Tages (Abb. 15(c)) ist ein vergleichsweise niedriger Wertebereich vorzufinden, der zwischen  $0,2$  und  $0,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  liegt. Generell scheinen die Werte im Tagesverlauf abzufallen von einem Wertebereich zwischen  $0,3$  bis  $0,50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$  zu einem Wertebereich zwischen  $0,4$  und  $0,2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ . Während des ersten Überfluges werden werte zwischen  $0,45$  und  $0,3$  angezeigt. Für den zweiten Überflug des Tages liegen keine Daten vor.

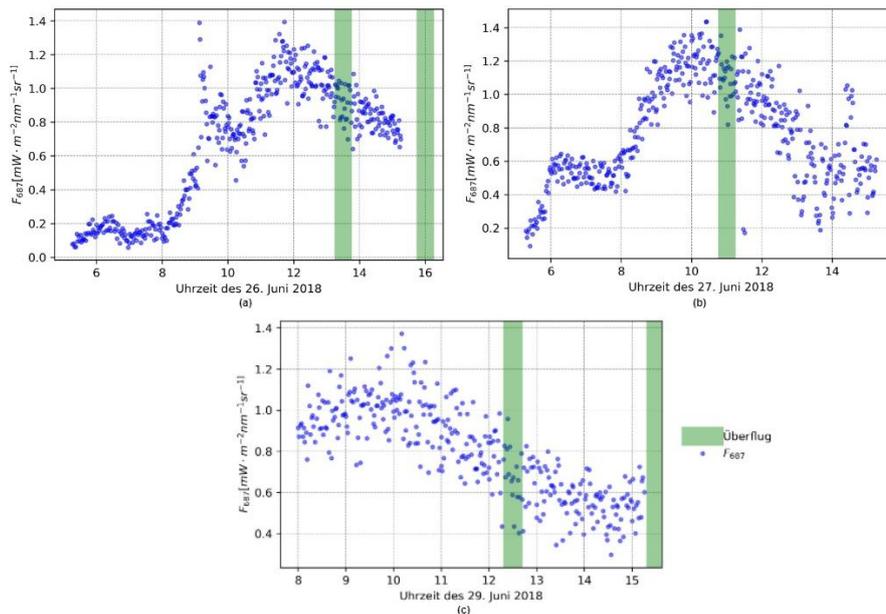


Abbildung 14: gefilterte  $F_{687}$ -Werte im Tagesverlauf dreier der vier Überflugstage gemessen mit der FloX an der nördlichen Station. Chronologische Reihenfolge: 26. Juni (a), 27. Juni (b) und 29. Juni (c).

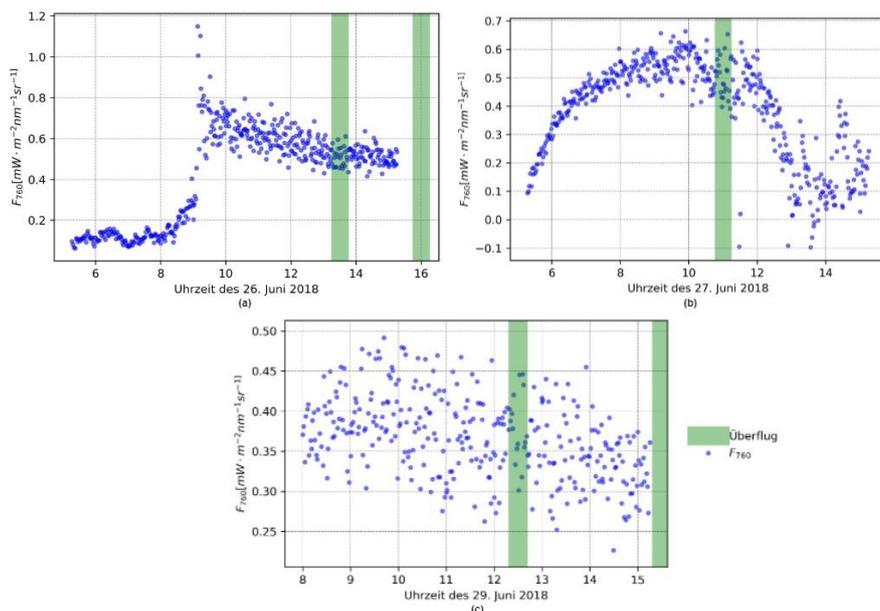


Abbildung 15: gefilterte  $F_{760}$ -Werte im Tagesverlauf dreier der vier Überflugstage gemessen mit der FloX an der nördlichen Station. Chronologische Reihenfolge: 26. Juni (a), 27. Juni (b) und 29. Juni (c).

### 3.3. Berechnungen des NDVI

Die Ergebnisse der NDVI-Berechnungen werden in Abbildung 16 dargestellt. Für den ersten Überflug (Abb. 16(a)) zeigt sich das Feld der nördlichen Station ein NDVI zwischen 0,6 und 0,8 mit einzelnen Teilgebieten, die auch auf 0,2 sinken können. Nördlich der Station weisen die Felder weitaus geringere Werte auf, die zwischen 0,2 und 0,4 liegen. Einzelne Felder im Nordosten weisen wiederum wieder Werte bis 1 oder 0,8 auf, während im Osten wieder verstärkt Felder mit niedrigen Werten hinzukommen, die Werte bis 0,4 anzeigen. Südlich und westlich der Station zeigen sich Felder, die Werte zwischen 0,6 und 0,8 vorweisen mit Teilbereichen, die höhere und niedrigere Werte zeigen.

Das Feld der südlichen Station weist hohe Werte bis 1 auf, was auch in einzelnen Feldern nördlich und westlich der Station vorzufinden ist. Jedoch zeigen einzelne Felder im Norden und auch im Osten wieder niedrige Werte zwischen 0 und 0,4 an. Südlich zeigen sich Schwankungen in den Werten, die zwischen 0,2 und 1 reichen.

Der zweite Überflug des 26. Juni (Abb. 16(b)) zeigt im Feld der nördlichen Station eine Erhöhung der Werte. Teilbereiche des Feldes weisen nun einen NDVI bis 1 auf, andere zeigen weiterhin Werte von 0,6 bis 0,8 an. Nördlich der Station sind noch immer Werte bis 0,4 zu sehen, die sich jedoch in einzelnen Teilbereichen auf unter 0,2 absenken. Der Nordosten zeigt auch hier Schwankungen an mit einzelnen Feldern höherer Werte bis 1 und Feldern, die ebenfalls zwischen 0 und 0,4 liegen. Diese Werte sind auch im Osten verstärkt vorzufinden. Südlich und westlich der Station sind auch die Werte angestiegen im Vergleich zum vorherigen Überflug. Die Werte reichen hier nun in größeren Gebieten bis 1, sinken tut der NDVI nicht unter 0,4. Das Feld der südlichen Station zeigt auch hier einen Wert bis 1 an, der auch weiterhin von einzelnen Feldern im Norden und Westen vorgewiesen wird. Nördlich und Östlich der Station sind hingegen auch Felder zu finden, die einen niedrigen NDVI zwischen 0 und 0,4 aufweisen. Südlich zeigen sich vereinzelt höhere Werte bis 1 und Werte bis 0,2.

Der Überflug am 27. Juni (Abb. 16(c)) weist in dem Feld der nördlichen Station einen NDVI bis 0,8 auf. Die Werte sinken wieder in den nördlich anliegenden Feldern bis auf 0,2. Im Nordosten sind auch hier größere Differenzen einzelner Felder zu beobachten, die teilweise Werte von 0,2 aufweisen als auch Werte bis 1. Östlich zeigt sich ein gewohntes Bild mit größtenteils Felder mit Werten zwischen 0 und 0,4, während auch Süden die Werte bis 1 ähnlich geblieben sind. Im Westen weisen die Felder Werte zwischen 0,4 und 0,8 auf.

Das Feld der südlichen Station zeigt hier wieder Werte bis 1. Dieser Wert ist auch im Westen und bei einzelnen Feldern im Norden zu sehen. Ebenfalls im Norden sieht man wieder einen niedrigen NDVI der bis auf 0 sinkt, was man ebenfalls im Osten sehen kann. Die südlich

angrenzenden Felder zeigen wieder eine größere Spanne an Werten an, die von 0 bis 1 reichen kann.

Der erste Überflug des 29. Juni (Abb. 16(d)) zeigt im Feld der nördlichen Station einen Fall der Werte, die zwar noch immer bis 0,8 reichen, aber zu größeren Teilen niedrigere Werte bis 0,2 vorweisen. Nördlich des Feldes vergrößern sich ebenfalls die Bereiche, die Werte zwischen 0 und 0,2 anzeigen. Nordöstlich sind die Schwankungen noch ebenso existent, wie bei den vorherigen Überflügen und liegen zwischen 0 und 1, wobei die Gebiete niedrigerer Werte sich ausgebreitet haben. Östlich zeigen sich viele Felder mit Werten zwischen 0 und 0,2. Südlich zeigt das angrenzende Feld Werte bis 1, die im Westen nicht vorzufinden sind. Hier liegen die Werte zwischen 0,2 und 0,8.

Das Feld, in dem die südliche Station steht, zeigt weiterhin einen NDVI bis 1 an, der auch hier in dem Feld westlich und in einzelnen Feldern nördlich überwiegt. Nördlich weisen einzelnen Felder allerdings auch niedrigere Werte auf, die bis 0 gehen können, was auch östlich vorzufinden ist. Südlich sind die Differenzen zwischen den Feldern immer noch stark. Einzelne Felder weisen einen NDVI bis 1 auf, bei anderen Feldern sinkt der Wert hingegen auf 0.

Am zweiten Überflug des 29. Juni (Abb. 16(e)) fehlt ein Flugstreifen, sodass im östlichen Bereich NDVI-Werte fehlen (rot angezeigt). Das Feld der nördlichen Station zeigt im Vergleich niedrigere Werte als zuvor, die zwar noch immer bis 0,8 reichen können, jedoch zu diesem Zeitpunkt größtenteils niedriger sind. Nördlich des Feldes vergrößern sich weiterhin die Gebiete mit niedrigen NDVI bis 0,2. Nordöstlich sieht man ebenfalls noch stärkere Schwankungen unter den einzelnen Felder mit NDVI-Werten zwischen 0 und 1. Im Osten zeigen sich auch hier einige Felder mit NDVI-Werten, die lediglich bis 0,2 reichen. Das südlich angrenzende Feld weist in einigen Bereichen noch Werte bis 1 an, jedoch verringert sich der Wert hier bis auf 0,6 in einzelnen Teilbereichen. Die westlich angrenzenden Felder liegen bei einem NDVI zwischen 0,2 und 0,8.

Das Feld der südlichen Station zeigt weiterhin einen NDVI bis 1. Dieser Wert wird auch hier in dem Feld westlich und in einzelnen Feldern nördlich beobachtet. Weiterhin zeigen sich im Norden und Osten vermehrt Felder mit niedrigen NDVI-Werten, die bis auf 0 abfallen. Südlich zeigen sich wieder Schwankungen, sodass die Felder Werte zwischen 0 und 1 vorweisen.

Während des letzten Überflugs (Abb. 16(f)) liegen die Werte im nördlichen Gebiet des Ausschnitts fast ausnahmslos bei. Ein einzelnes Feld zeigt dort Werte bis 0,8 an und einzelne Felder im Osten weisen im Durchschnitt Werte bis 0,4 auf. Das Feld der südlichen Station zeigt noch immer erhöhte Werte bis 0,8 an und das westlich angrenzende Feld weist Werte bis 1 auf. Einzelne Felder im Norden und Süden weisen noch immer erhöhte Werte auf, die teilweise bis 1 reichen. Jedoch befinden sich in diesem Gebiet auch Felder mit Werten um 0 bis 0,2.

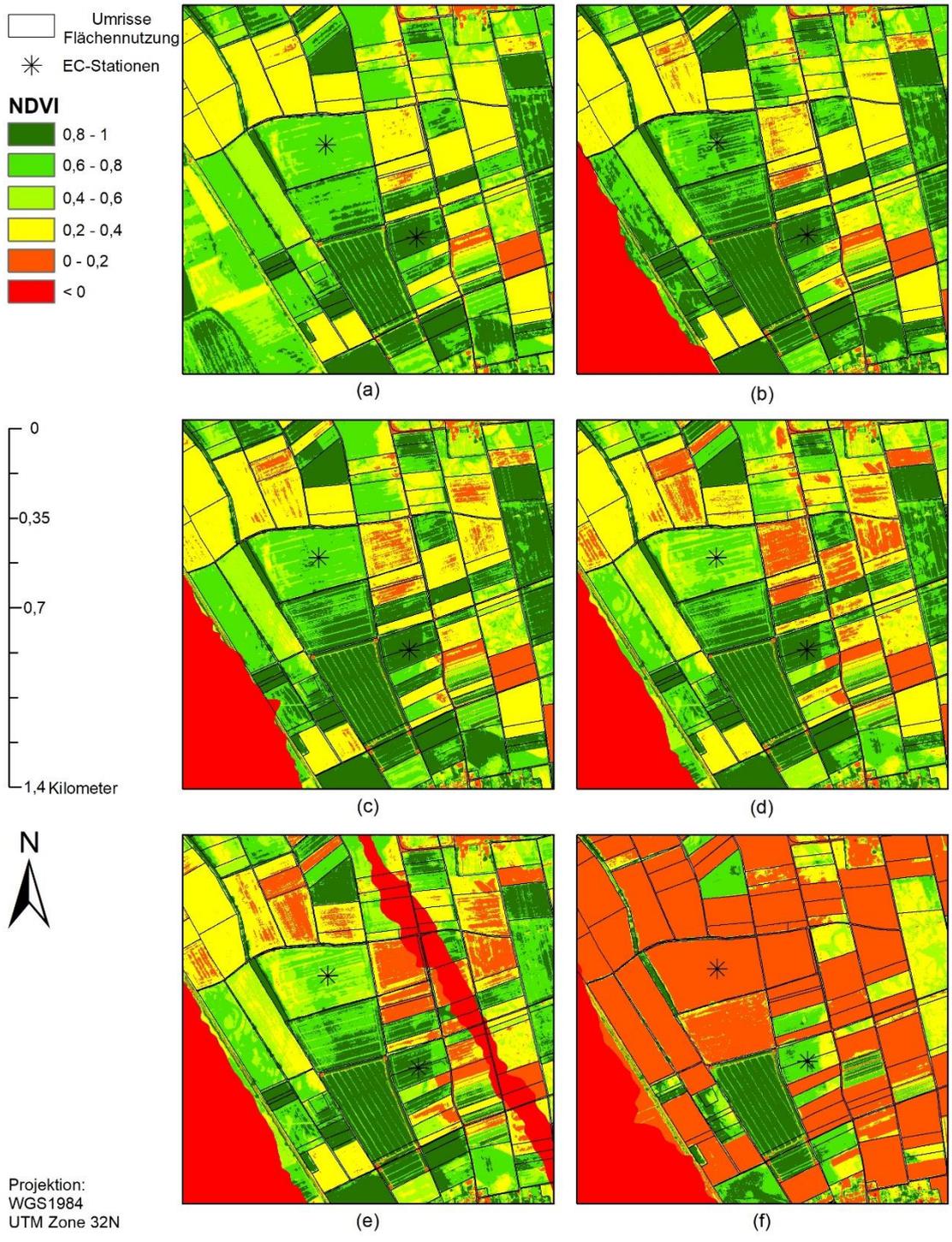


Abbildung 16: Darstellung des NDVI für jeden Überflug. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

### 3.4. Ableitung der Primärproduktion

Die Ableitung der Primärproduktion wurde mit der Methode nach REICHSTEIN et al. (2005) durchgeführt, welche die NEE-Daten nutzt, die anhand der EC-Methode gemessen wurden. Die nördliche Station (Tab. 4) maß während des ersten Überfluges am 26. Juni einen NEE-Wert von  $-16,82 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Dieser ist höher als der Wert des zweiten Überfluges am selben Tag, welcher  $14,81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  beträgt. Am 27. Juni hat die Station einen Wert von  $-7,48 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  gemessen. Die beiden Werte, welche während der beiden Überflüge am 29. Juni durchgeführt wurden, betragen  $-4,4$  und  $-2,01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Während des letzten Überflugs am 2. August zeigt sich ein positiver Wert von  $4,31 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Daraus resultiert mit der Methode nach REICHSTEIN (2005) für den ersten Überflug ein GPP-Wert von  $21,87 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  und für den zweiten Überflug von  $20,36 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Der GPP-Wert des dritten Überflugs der Kampagne weist einen Wert von  $12,77 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  auf. Der vierte und fünfte Überflug zeigen Werte von  $9,79$  und  $7,73 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , während der letzte Überflug einen negativen GPP-Wert von  $-1,44 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  aufweist.

*Tabelle 4: Ergebnisse der NEE-Messungen und GPP-Ableitung der nördlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge.*

Überflug	NEE [ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	GPP [ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
26.06.2018 - 1	-16,82	21,87
26.06.2018 - 2	-14,81	20,36
27.06.2018	-7,48	12,77
29.06.2018 -1	-4,4	9,79
29.06.2018 -2	-2,01	7,73
02.08.2018	4,31	-1,44

Im Vergleich zur nördlichen Station zeigt die südliche Station höhere Werte (Tab. 5). Die NEE-Werte liegen während der ersten beiden Überflüge bei  $-32,16$  und  $-18,79 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Am 27. Juni maß die Station zum Zeitpunkt des Überfluges einen Wert von  $-27,35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Die beiden Werte am 29. Juni zeigen  $-20,56$  und  $-10,55 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Unterdessen zeigt die Station während des letzten Überflugs einen Wert von  $-6,8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Somit zeigen sich abgeleitete GPP-Werte für den ersten Tag von  $35,83$  und  $22,74 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , sowie  $31,13 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  für den zweiten Tag. Der dritte Tag weist Werte von  $24,14$  und  $14,32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  auf. Der letzte Tag gibt zum Zeitpunkt des Überflugs einen Wert von  $11,23$  wieder.

Tabelle 5: Ergebnisse der NEE-Messungen und GPP-Ableitungen der südlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge.

Überflug	NEE [ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	GPP [ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
26.06.2018 - 1	-32,16	35,83
26.06.2018 - 2	-18,79	22,74
27.06.2018	-27,35	31,13
29.06.2018 -1	-20,56	24,14
29.06.2018 -2	-10,55	14,32
02.08.2018	-6,8	11,23

### 3.5. Berechnung der Footprints

Die Footprints, welche den CO<sub>2</sub>-Einflussbereich wiedergeben und mittels der Methode nach KORMANN & MEIXNER (2001) berechnet wurden, sind in den angesprochenen Sequenzen dargestellt und beschrieben. Für die nördliche Station liegen folgende Ergebnisse vor (Abb. 17): Zum ersten Überflugszeitpunkt des 26. (Abb. 17(a)) Juni sieht man einen Footprint der Richtung Nordosten gerichtet ist und eine gestauchte Form wiedergibt. Der Footprint zeigt, dass 66 % des gemessenen CO<sub>2</sub> aus einem Gebiet kommen, das nur wenige Meter von der Station entfernt ist. 95 % des gemessenen CO<sub>2</sub> liegen noch innerhalb des Feldes, in dem die Station steht, während 98 % des Footprints über die Feldgrenzen schreiten.

Der Footprint des zweiten Überflugs (Abb. 17(b)) spiegelt eine andere Windrichtung wider, die eher gen Norden tendiert. Auch die Sequenzen des Footprints zeigen andere Bedingungen im Vergleich zum ersten Überflug, die gestreckt mit der Windrichtung verlaufen. Hier stammen nur 66 % des gemessenen Footprints innerhalb des Feldes der Station. Weitere Sequenzen überlappen die Feldgrenzen, sodass hier weitere Felder Einfluss auf das gemessene CO<sub>2</sub> zeigen. Dabei stößt 98 % des Footprints an die räumliche Berechnungsgrenze, die bei einer Entfernung von ca. 500 m auftritt.

Am 27. Juni (Abb. 17(c)) zeigt der Footprint zum Zeitpunkt des Überflugs wieder eine gestauchte Form in Richtung Osten. Die einzelnen Sequenzen des Footprints zeigen an, dass mehr als 98 % des gemessenen CO<sub>2</sub> aus dem Feld der Station kommen und somit nicht durch die angrenzenden Felder beeinflusst werden.

Der vierte Überflug, der am 29. Juni (Abb. 17(d)) stattfand, zeigt Richtung Nordosten und hat eine gestreckte Form. Wie bei den vorherigen Überflügen werden die Sequenzen bis 66 % ausschließlich von dem Feld der Station beeinflusst, während die Sequenz, die 90 % darstellt,

schon über die Feldgrenze hinausgeht. Die darauffolgenden Sequenzen haben ihren Einflussbereich aus weiteren Feldern.

Der zweite Überflug am 29. Juni (Abb. 17(e)) zeigt eine ähnliche Form wie die des Überflugs des früheren Zeitpunktes am selben Tag. Die Form ist ebenso gestreckt und die Richtung geht gen Nordosten. Hier zeigen 90 % des Footprints einen Einfluss des Weizenfeldes, während die weiteren Sequenzen weitere Felder als Einflussbereich wiedergeben.

Der letzte Überflug am 2. August (Abb. 17(d)) weist in die nordöstliche Richtung und zeigt eine eher rundere Form. Die einzelnen Sequenzen sind auch wieder kleiner, sodass 90% des gemessenen CO<sub>2</sub> aus dem Feld der Station kommt. 95 % des Footprints übertreten lediglich einen geringen Teil außerhalb des Feldes und auch 98 % des Footprints geben nur wenige Felder als zusätzlichen Einflussbereich an.

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse für die südliche Station. Hier zeigt der erste Überflug am 26. Juni (Abb. 18(a)) in Nordwestliche Richtung und weist eine leicht gestreckte Form auf. Das Zuckerrübenfeld hat einen Einfluss auf 90 % des gemessenen CO<sub>2</sub>, während die größeren Sequenzen weitere Felder, wenn auch nur zu kleinen Teilen, mit einbeziehen.

Der Footprint des zweiten Überflugs des 26. Juni (Abb. 18(b)) zeigt eine gestreckte Form, sodass die einzelnen Sequenzen wieder größer ausfallen. Die Richtung des Footprints verläuft gen Norden. Die Sequenzen bis 66 % weisen einen Einflussbereich auf, der sich nur auf das Feld der Station bezieht. Die nachfolgenden Sequenzen zeigen Einflüsse weiterer Felder im Norden.

Am 27. Juni (Abb. 18(c)) zeigt der Footprint eine gestauchte Form Richtung Westen. Die Sequenzen fallen räumlich klein aus. Die Sequenzen bis zu 95 % werden von dem Feld der Station beeinflusst. Die 98 %-Sequenz wird dazu von dem südlich angrenzenden Feld bedient.

Während des erstens Überflugs des 29. Juni (Abb. 18(d)) zeigt der Footprint eine gestreckte Form, die Richtung Nordosten verläuft. Die Sequenzen bis 66 % werden ausschließlich von dem Feld der Station beeinflusst. 90 % zeigen zu kleinen Teilen Einflüsse anliegender Felder. Die höheren Sequenzen werden noch von weiteren Feldern im Nordosten geprägt.

Der Footprint während des zweiten Überfluges am 29. Juni (Abb. 18(e)) weist wieder eine gestreckte Form auf, welche sich Richtung Nordosten zieht. Die Sequenzen bis 90 % werden lediglich durch das Zuckerrübenfeldes beeinflusst, in der die Station steht. Mehrere Felder im Nordosten wirken sich auf das gemessenen CO<sub>2</sub> an der Station in den späteren Sequenzen aus. Zum Zeitpunkt des letzten Überflugs (Abb. 18(f)) zeigt der Footprint eine leicht gestreckte Form, die Richtung Norden zeigt. Alle Sequenzen bis 95 % zeigen, dass diese von dem Feld der Station beeinflusst werden, während die Sequenz, die 98 % des gemessenen CO<sub>2</sub> widerspiegelt, von lediglich zwei weiteren Feldern im Norden Auswirkungen spürt.

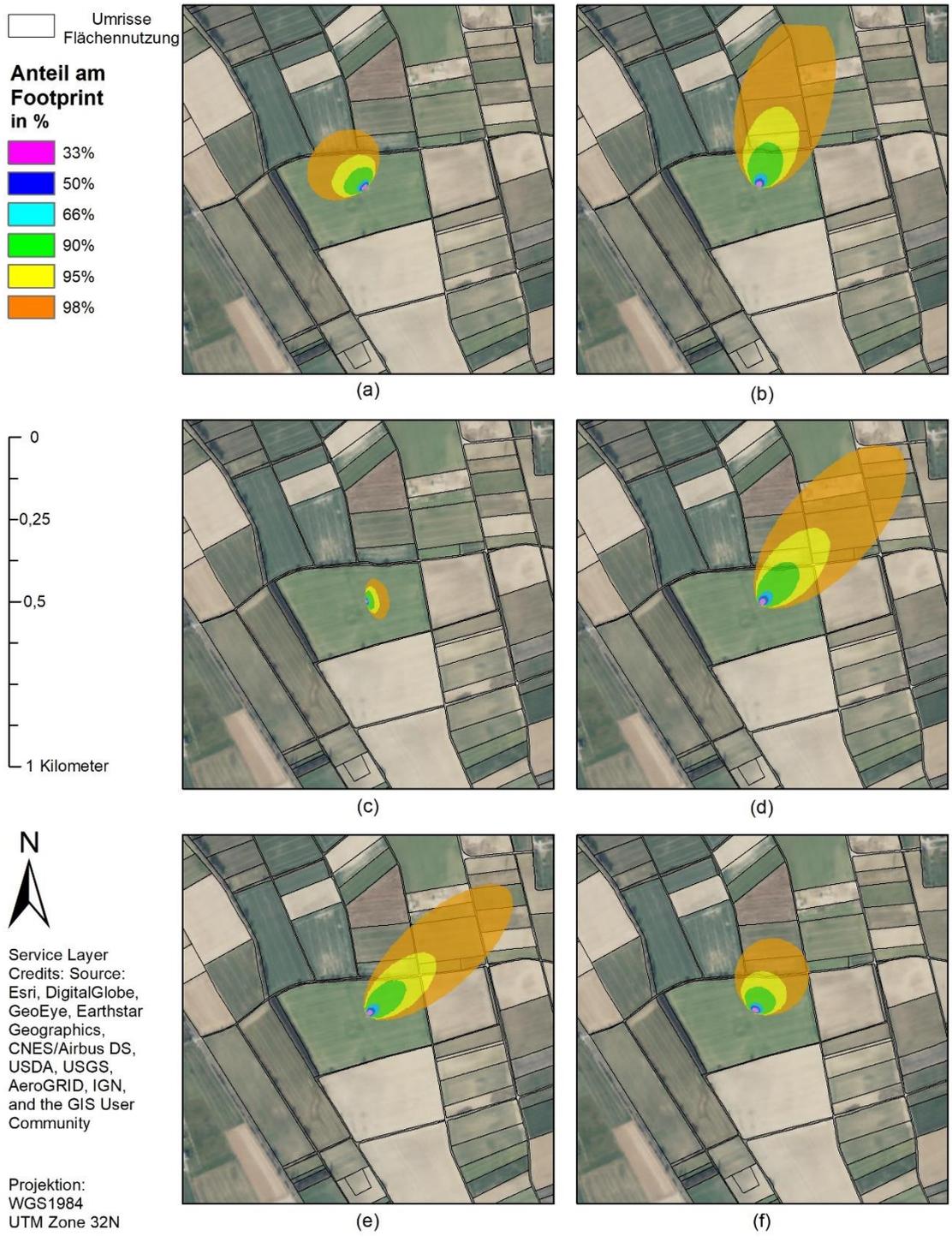


Abbildung 17: Darstellung der Footprints an der nördlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

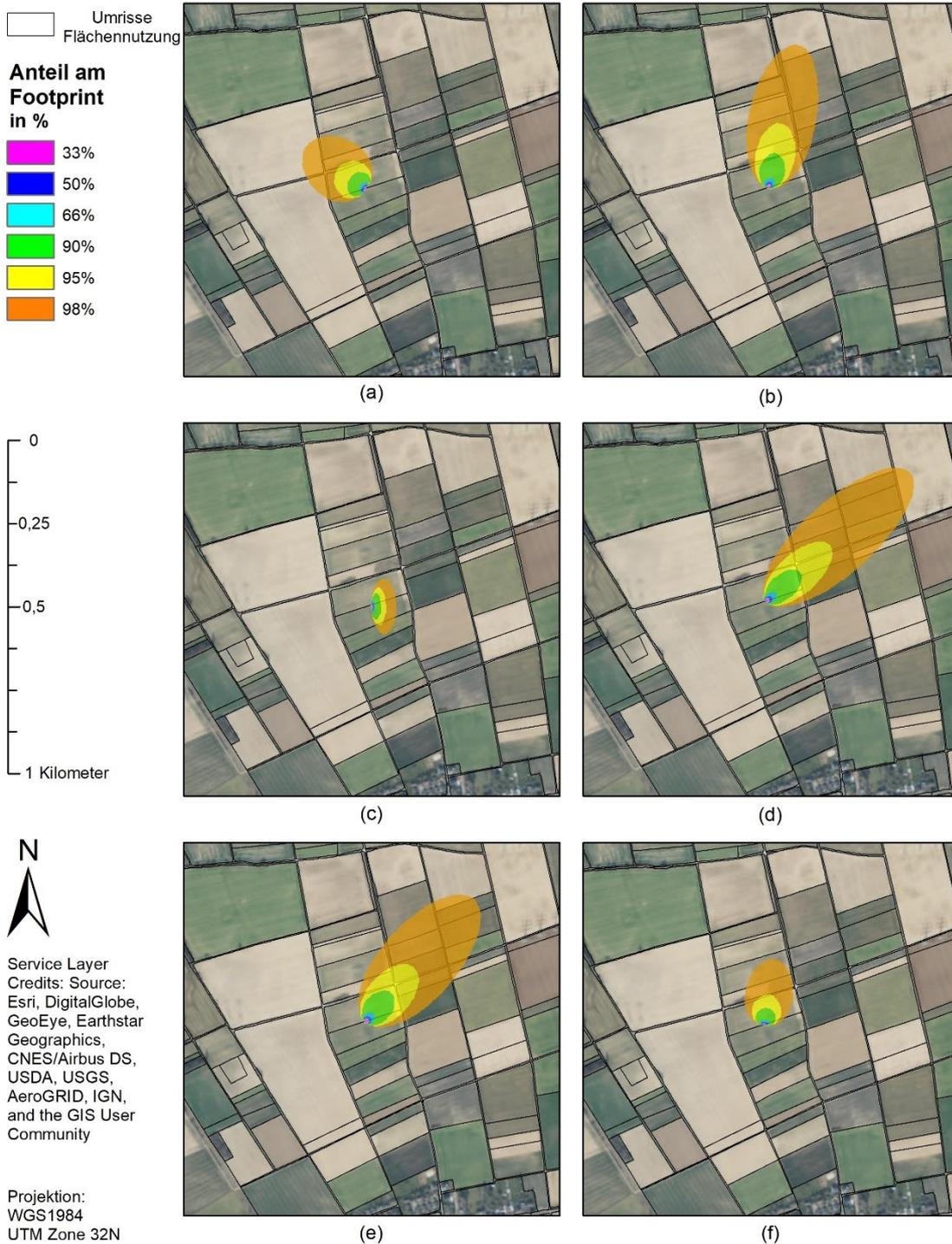


Abbildung 18: Darstellung der Footprints der südlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge. Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

Durch die Akkumulation der Pixelwerte ergibt sich ein Gesamtwert, der das gemessene CO<sub>2</sub> wiedergibt. Tab. 6 zeigt diese akkumulierten Werte für jeden Footprint. Während des ersten Überflugs weist der Footprint der ersten Station einen Gesamtwert von 99,66 % auf. Der Footprint des zweiten Überflugs zeigt 98,4 % und des dritten Überflugs 100,15 %. Für die Überflüge des 29. Juni zeigen die Footprints 98 % und 98,63 %. Der Footprint des letzten Überflugs zeigt an der nördlichen Station 99,6 %.

Bei der südlichen Station wurde während des ersten Überflugs ein Footprint berechnet, der einen Gesamtwert von 99,55 % aufweist. Der Footprint des zweiten Überflugs zeigt einen Wert von 98,72 und der des dritten Überflugs von 100,3 %. 98,59 % werden beim Footprint des vierten Überflugs erreicht und 98,8 % beim Footprint des fünften Überflugs. Der Footprint während des Überflugs am 2. August zeigt 99,35 %. Die Werte der Footprints vom 27. Juni belaufen sich über 100%, weshalb die diese Überflüge von weiteren Berechnungen ausgeschlossen wurden.

*Tabelle 6: Kommutierte Pixelwerte der genutzten Footprints.*

Überflug	Nördliche Station	Südliche Station
26.06.2018 – 1	99,66%	99,55%
26.06.2018 - 2	98,4%	98,72%
27.06.2018	100,15%	100,3%
29.06.2018 - 1	98%	98,59%
29.06.2018 - 2	98,63%	98,8%
02.08.2018	99,6%	99,35%

### 3.6. Windverhältnisse

Die Windverhältnisse zum Zeitpunkt der Überflüge werden in den Abbildungen 19 und 20 dargestellt. An der nördlichen Station zeigt sich beim ersten Überflug (Abb. 19(a)) weist die Windrichtung nach Nordwesten mit einer Geschwindigkeit, die zwischen 1,5 und 2,5 m s<sup>-1</sup> liegt. Der zweite Überflug (Abb. 19(b)) zeigt eine verstärkte Windgeschwindigkeit zwischen 2 und 3,5 m s<sup>-1</sup> aus nordnordöstlicher Richtung. Der Wind zeigt während des dritten Überfluges (Abb. 19(c)) eine Geschwindigkeit zwischen 0 und 1,5 m s<sup>-1</sup> mit einer Windrichtung die hauptsächlich gen Südosten verläuft als auch nach Nordosten. Zu Zeitpunkt des vierten Überflugs (Abb. 19(d)) herrschen wieder stärkere Windgeschwindigkeiten vor, die zwischen 2,5 und 3,5 m s<sup>-1</sup> liegen. Die Windrichtung liegt in nordöstlicher Richtung. Auch während des fünften

Überflugs (Abb. 19(e)) liegt die Windrichtung im Nordosten mit einer Windgeschwindigkeit zwischen 2 und 2,5 m s<sup>-1</sup>. Am sechsten Überflug (Abb. 19(f)) konnte man Windgeschwindigkeiten zwischen 0,5 und 2,5 m s<sup>-1</sup> beobachten, die aus nordnordöstlicher Richtung kamen.

Die südliche Station maß zum Zeitpunkt des ersten Überflugs (Abb. 20(a)) Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 2 m s<sup>-1</sup> bei einer Windrichtung, die sich in westnordwestlicher Richtung befand. Während des zweiten Überflugs (Abb. 20(b)) befindet sich die Windrichtung in nördlicher Richtung mit einer Geschwindigkeit von 1,5 bis 3 m s<sup>-1</sup>. Am dritten Überflugszeitpunkt (Abb. 20(c)) zeigen sich geringe Windgeschwindigkeiten zwischen 0 und 1,5 m s<sup>-1</sup> mit Windrichtungen, die zwischen nordnordöstlicher und Südwestlicher Richtung schwanken. Der vierte Überflug (Abb. 20(d)) weist Windgeschwindigkeiten zwischen 2 und 3 m s<sup>-1</sup> auf, die aus Richtung Nordwesten kommend gemessen wurden. Während des fünften Überflugs (Abb. 20(e)) lag die Windrichtung in nordöstlicher Richtung mit Windgeschwindigkeiten von 2 bis 2,5 m s<sup>-1</sup>. Zum Zeitpunkt des letzten Überflugs (Abb. 20(f)) zeigen sich Windgeschwindigkeiten zwischen 0,5 und 2,5 m s<sup>-1</sup> mit einer Windrichtung aus Nordnordost.

### 3.7. Zusammenhang zwischen Chlorophyllfluoreszenz und Primärproduktion

Der Zusammenhang zwischen SIF und GPP unter Beachtung unterschiedlicher Nutzungsanteile des Footprints und unterschiedlicher SIF-Produkte wird in der Tabelle 7 dargestellt. Bei der Zusammenführung der Daten beider Stationen sieht man für das Produkt  $F_{687}$  keine Korrelation, was mit R<sup>2</sup>-Werten zwischen 0,08 und 0,05 beschrieben wird.  $F_{760}$  weist hingegen besserer Werte bis maximal 0,35 auf, die bei einem Anteil des Footprints von 66 % und 90 % berechnet wurden. Bei der Nutzung kleinerer und höherer Footprintanteile fallen die R<sup>2</sup>-Werte auf 0,33 bzw. 0,32 ab. Die totale Fluoreszenz zeigt den Maximalwert von 0,31 ebenfalls bei 66 % des Nutzungsanteils des Footprints. Der Wert sinkt Richtung kleinerem Footprint auf 0,29 und Richtung größeren Nutzungsanteil auf 0,26. Das Produkt  $F_{Ratio}$  zeigt hier für die Nutzung beider Stationen den höchsten R<sup>2</sup>-Wert von 0,46, der bei 90 % des Nutzungsanteils des Footprints berechnet wurde. Ein geringer Abfall der Werte auf 0,44 ist bei 66 % und 95 % zu sehen und generell sinkt der Wert nicht unter 0,39.

Des Weiteren werden die Ergebnisse noch in die einzelnen Stationen aufgeschlüsselt. Die nördliche Station zeigt für  $F_{687}$  durchweg schlechte R<sup>2</sup>-Werte, die nicht über 0,07 steigen. Dieser Wert ist bei einem Nutzungsanteil des Footprints von 90 % und 98 % zu sehen. Bei einem geringeren Nutzungsanteil von 33 % sinkt der Wert auf 0,04 bzw. bei 50 % auf 0,03. Bei dem SIF-Produkt  $F_{760}$  zeigt sich hingegen ein komplett anderes Bild. Hier werden R<sup>2</sup>-Werte von 1 bei

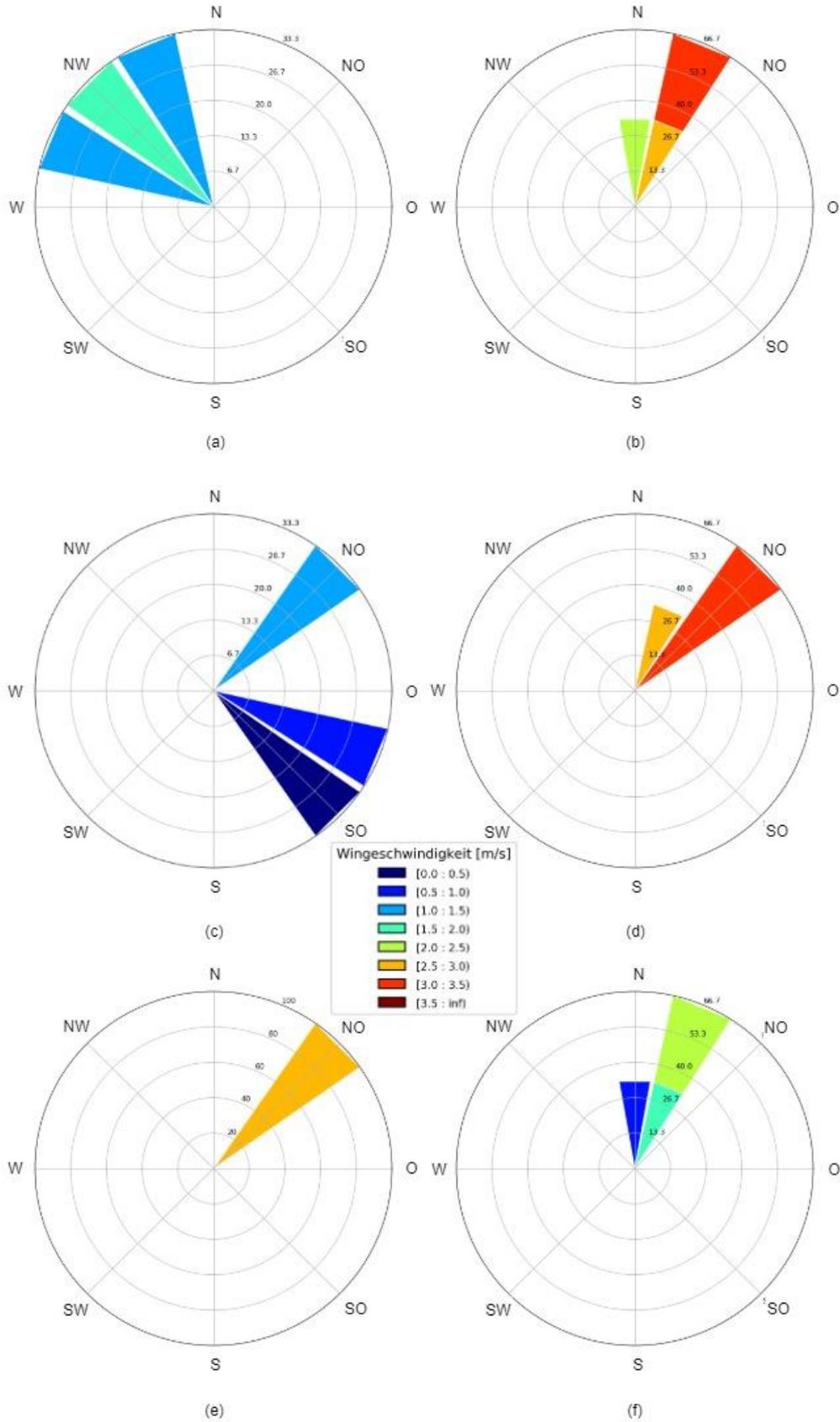


Abbildung 19: Winddaten der nördlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge (gemessen in 10-minütigen Intervallen). Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

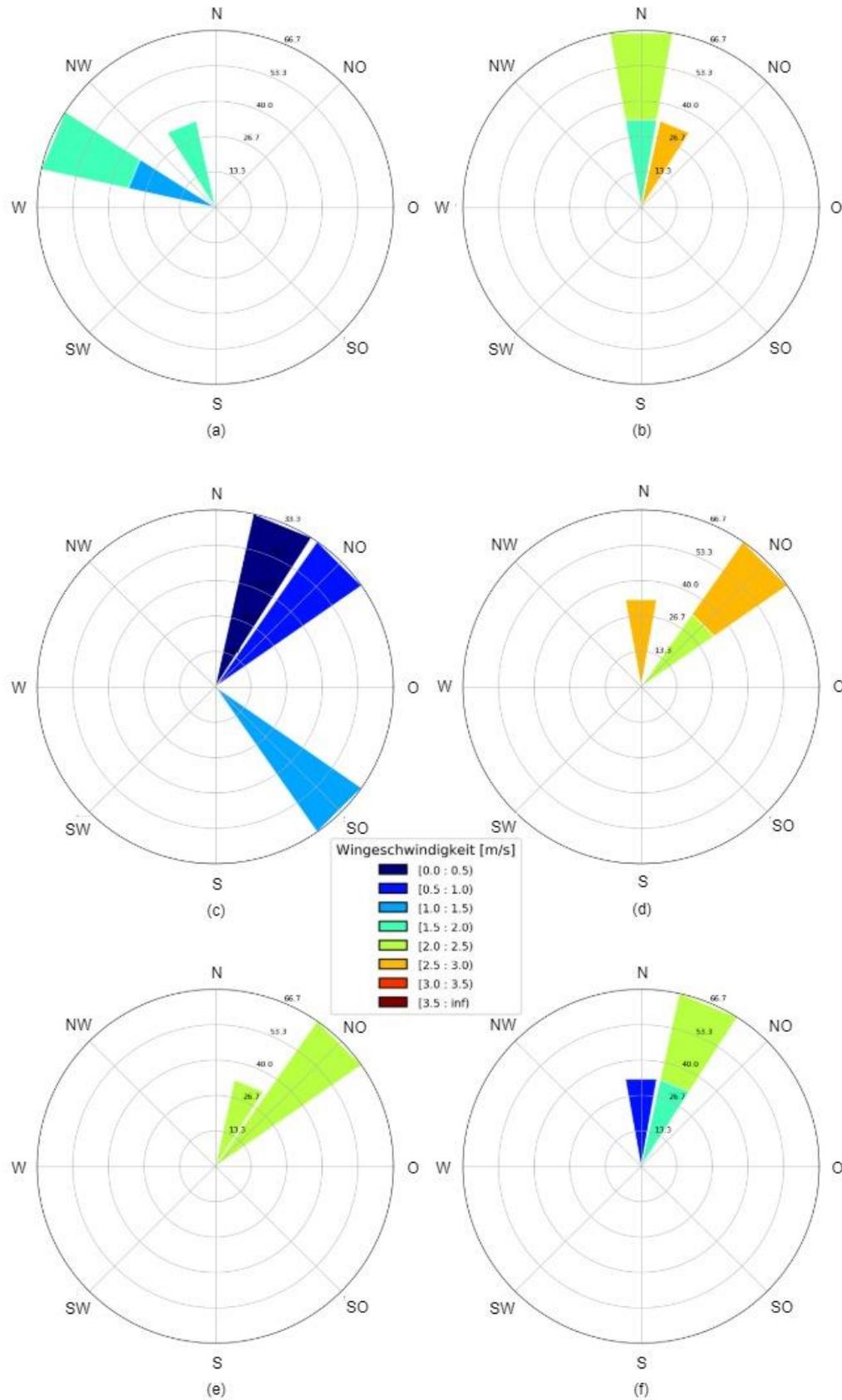


Abbildung 20: Winddaten der südlichen Station zum Zeitpunkt der Überflüge (Gemessen in 10-minütigen Intervallen). Chronologische Reihenfolge der Überflüge: Erster (a) und zweiter Überflug (b) des 26. Juni, 27. Juni (c), Erster (d) und zweiter Überflug (e) des 29. Juni und 2. August (f).

Footprintanteilen von 33 % und 50 % angegeben. Auch bei 66% ist noch ein Wert von 0,98 ersichtlich. Daraufhin sinken die Werte bis zu 98 % auf 0,61 ab. Auch  $F_{\text{tot}}$  zeigt eine starke Korrelation zwischen SIF und GPP. Bei Nutzungsanteilen von 33 % und 50 % werden hier  $R^2$ -Werte von 0,97 angezeigt. Bei 66 % gibt es noch immer eine Korrelation von 0,93 sowie bei 90 % von 0,73. Bei höheren Anteilen sinkt der Wert bis auf 0,5.  $F_{\text{Ratio}}$  weist ebenso höhere  $R^2$ -Werte auf, die bei 0,95 gipfeln, welcher bei 33 % des Footprints vorliegt. Der Wert fällt bei 50 % auf 0,94 und bei 66 % auf 0,91 ab. Bei 90 % zeigt sich noch ein  $R^2$ -Wert von 0,76, welcher bei höheren Nutzungsanteil auf 0,5 sinkt.

Für die südliche Station zeigt sich wieder ein anderes Bild.  $F_{687}$  zeigt den Höchstwert von 0,33 bei 90 % des Footprint und auch bei 66 % und 95 % sinkt dieser gerade auf 0,32 ab. Ein kleinerer Footprint von 33 % zeigt einen Wert von 0,16 und ein größerer Footprint von 98 % einen Wert von 0,28. Bei  $F_{760}$  zeigen sich durchweg Werte, die 0,09 nicht übersteigen, welche bei 66 % des Nutzungsanteils erkenntlich sind. In Richtung geringerer Nutzungsanteile sinkt der Wert auf 0,06. Der niedrigste Wert von 0,04 zeigt sich bei 95 % des Footprints. Auch bei  $F_{\text{tot}}$  ist kaum eine Korrelation vorhanden. Der Höchstwert von 0,02 befindet sich bei 98% des Footprints und der Wert sinkt auf 0 bei 33 %. Der Höchstwert der südlichen Station zeigt sich bei  $F_{\text{Ratio}}$ , welcher bei 0,53 liegt und bei 66 % und 33 % erfasst wurde. Bei 50 % Nutzungsanteil liegt der  $R^2$ -Wert bei 0,49. Größere Nutzungsanteile am Footprint zeigen wiederum schlechtere Werte, die bis auf 0,28 (bei 90 %) und 0,2 (bei 95 % und 98 %) abfallen.

Tabelle 7: R<sup>2</sup>-Werte zwischen SIF-Produkten und GPP für unterschiedliche Sequenzierungen des Footprints (rot: 0 - 0,3; gelb: 0,3 - 0,7; grün: 0,7 - 1)

SIF-Produkt	Station/en	33% des Footprints	50% des Footprints	66% des Footprints	90% des Footprints	95% des Footprints	98% des Footprints
F <sub>687</sub>	Beide	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	0,06	0,05	0,05
F <sub>760</sub>		0,33	0,34	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	0,33	0,32
F <sub>tot</sub>		0,29	0,30	<b>0,31</b>	0,28	0,26	0,26
F <sub>Ratio</sub>		0,40	0,41	0,44	<b>0,46</b>	0,44	0,39
F <sub>687</sub>	Norden	0,04	0,03	0,06	<b>0,07</b>	0,06	<b>0,07</b>
F <sub>760</sub>		<b>1</b>	<b>1</b>	0,98	0,85	<b>0,72</b>	0,61
F <sub>tot</sub>		<b>0,97</b>	<b>0,97</b>	0,93	0,73	0,6	0,50
F <sub>Ratio</sub>		<b>0,95</b>	0,94	0,91	0,76	0,64	0,50
F <sub>687</sub>	Süden	0,16	0,26	0,32	<b>0,33</b>	0,32	0,28
F <sub>760</sub>		0,06	0,07	<b>0,09</b>	0,05	0,04	0,06
F <sub>tot</sub>		0	0,01	0,01	0,01	0,01	<b>0,02</b>
F <sub>Ratio</sub>		<b>0,53</b>	0,49	<b>0,53</b>	0,28	0,20	0,20

## 4. Diskussion

### 4.1. Methodenkritik

Methodisch sind hier einige Faktoren zu betrachten, welche die Ergebnisse unter Umständen verfälscht haben könnten. Zu allererst ist die Stichprobengröße zu bemängeln, die sich für den kompletten Datensatz auf zwölf beläuft, die nach der Aufteilung auf die einzelnen Stationen nur auf eine Größe von sechs, bzw. fünf nach Ausschluss der Footprints vom 27. Juni, beträgt. Da mit zunehmender Stichprobengröße die Weite des Konfidenzintervalls sinkt, kann so eher auf die wirklichen Werte geschlossen werden (CAMPBELL & WHYNNNE 2011: 398). Die hier vorliegenden Daten können höchstens Tendenzen aufzeigen, die bei weiterer Forschung mit dieser Methodik begutachtet werden können.

Bei Betrachtung der Zeiträume, in denen die Messungen stattfanden, muss man bedenken, dass der Überflug mit dem HyPlant-Sensor das Untersuchungsgebiet innerhalb kürzester Zeit aufgenommen hat. Die EC-Stationen hingegen nehmen Daten über einen Zeitraum einer halben Stunde auf. Innerhalb einer halben Stunde können sich auch die SIF-Werte insbesondere zu frühen und späten Zeitpunkten im Tagesverlauf verändern. Abb. 14 und Abb. 15 zeigen SIF-Werte im Tagesverlauf, die an der nördlichen EC-Station mit einer FloX aufgenommen wurden. Die Daten zeigen, dass es zu stärkeren Abweichungen der SIF-Werte innerhalb einer halben Stunde kommen kann, sodass man nicht unbedingt davon ausgehen kann, dass der Pixelwert den halbstündigen Durchschnittswert repräsentiert. Generell ist allerdings ebenso anzumerken, dass die Genauigkeit der SIF-Ableitung durch die iFLD-Methode bei  $0,2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$  liegt, sodass die Abweichungen, welche die FloX-Daten darstellen, nicht zu jedem Überflugszeitraum überschritten werden.

Die Sequenzierung der Footprints entspricht auch nur in den höheren prozentualen Bereichen dem genau angegebenen Wert, da in diesen Bereichen die Pixelwerte so niedrig sind, um genau auf diese Werte zu kommen. Bei einer 33 %-Sequenzierung kann es zu tatsächlich höheren Werten kommen, da die Pixelwerte höher sind und somit bei der Addition die Grenzwerte überschreiten könnten. Somit entsprechen die Sequenzierungen nicht für jeden Footprint dem komplett gleichen Wert.

## 4.2. Dürrestress

Geringe Werte in SIF als auch in GPP können auf den Dürrestress der Agrarfrüchte zurückzuführen sein. Das Jahr 2018 bot geringe Niederschlagsmengen im Umfeld des Untersuchungsgebietes, welches mit über 200 mm weniger Niederschlag auskommen musste im Vergleich zum durchschnittlichen Jahresmittel. Auch die Jahresmitteltemperatur lag mit 11,8°C über dem durchschnittlichen Jahresmittel von 10°C. Dürrestress führt in den Pflanzen zu der Schließung der Stomata aufgrund des steigenden Evaporationsbedarfs, was schließlich zu einer reduzierten Aufnahme von CO<sub>2</sub> führt. Somit führt Dürrestress schon früh zu einer Reduzierung von GPP (WOHLFAHRT et al. 2018: 4). Ebenso zeigte YOSHIDA et al. (2015), dass auch eine Verringerung der Intensität von SIF durch Dürrestress hervorgerufen wird. Dies gilt besonders für agrarlandschaftlich geprägte Gebiete.

## 4.3. Entwicklungsstadien der Pflanzen

Die Dürre des Jahres 2018 ist ebenso in den NDVI-Karten (Abb. 16) zu erkennen. Niedrige NDVI-Werte können darauf schließen, dass die Aufnahmen bei einigen Pflanzenarten zu späten Zeitpunkten innerhalb ihrer Vegetationsperiode bzw. nach der Ernte durchgeführt wurden. Vergleicht man diese NDVI-Karten mit der Flächennutzung (Abb. 2) so ist erkennbar, dass der NDVI insbesondere in den Feldern, auf denen Gerste angebaut wurde, unter 0,4 liegt und im Verlauf der Junitage weiter abschwächt. Dieses Verhalten zeigt auch der Raps, der wie die Gerste die Erntezeit im Juli hat (BMEL 2018: 10; 38), sodass man von geringen Chlorophyllgehalten in den Pflanzen ausgehen kann.

Auch der Winterweizen zeigt im Verlauf der Tage eine Abschwächung des NDVI, was mit der starken Dürre im Zusammenhang stehen kann. Dies ist besonders erkennbar am letzten Überflug Anfang August, da Winterweizen in der Regel erst im Verlauf des Augustes und Septembers geerntet wird (BMEL 2018: 8), was auf eine frühzeitige Ernte schließen lassen kann. Darauf deuten auch die Stoffflussmessungen durch die EC-Methode.

Die Zuckerrüben zeigen Ende Juli noch erhöhte Werte, was auf eine hohe Vitalität hinweist. In keinem der Aufnahmen kann man von einer frühzeitigen Ernte ausgehen, die normalerweise zwischen September und November vonstattengeht (BMEL 2018: 36). Jedoch erkennt man eine Abmilderung der Werte, was zumindest auf eine späte Phase der Vegetationsperiode spricht.

Die Kartoffeln weisen auf allen Aufnahmen durchweg NDVI-Werte zwischen 0,8 und 1 auf, was für vitale Pflanzen spricht und somit gegen eine anstehende Ernte, die üblicherweise bis in den Oktober reichen kann (BMEL 2018: 58).

#### 4.4. Sonneninduzierte Chlorophyllfluoreszenz

Die SIF-Ableitungen, die anhand der iFLD-Methode durchgeführt wurde, zeigt in dieser Arbeit schwächen, da die Methode SIF unterschätzt, was an der hohen Anzahl negativer Werte festzumachen ist. Negative Chlorophyllfluoreszenz ist jedoch in der Theorie nicht vorgesehen, sodass die empirische Korrektur fehlerhaft sein muss. Diese wird durch vegetationslose Referenzflächen durchgeführt, die kein SIF vorweisen sollten. Indem jedoch Referenzflächen genutzt wurden, die SIF zeigen und auf 0 gesetzt wurden, werden niedrigere Werte im Verhältnis zur Referenzfläche negativ dargestellt. Dieses Problem kann bei mehreren Methoden vorkommen und ist häufig auf die rotierende Raman-Streuung zurückzuführen (Ni et al. 2019: 13). Diese beinhaltet Lichtstreuung an Sauerstoff und Stickstoffmolekülen (LAMPEL et al. 2015: 3767), wo Photonen mit kürzerer Wellenlänge absorbiert und mit längerer Wellenlänge remittiert werden. So kann Licht mit einer Wellenlänge von 685 nm durch eine Absorption bei 555 nm entstehen (HOUT & BABIN 2010: 53). Dieser Prozess kann zu einer zusätzlichen Strahlungsintensität in anderen Wellenlängenbereichen führen und somit die genutzten Wasserstoffabsorptionsbänder beeinflussen (LAMPEL et al. 2015: 3767). Ebenso könnte der Adjacency-Effekt eine Rolle spielen, der die Streuung der pflanzlichen Lichtemission von umliegenden Gebieten in Richtung des Sensors beschreibt (VERHOEF & BACH 2003: 27). Vergleicht man die Werte, die von der FloX gemessen wurde (Vgl. Abb. 14 & 15) mit den Ableitungen von HyPlant erkennt man auch gewisse Unterschiede. So scheinen die FloX-Messungen von  $F_{687}$  höher als die Ableitungsergebnisse, was für die falsche Setzung des 0-Wertes spricht. Die Daten der FloX-Messungen von  $F_{760}$  hingegen zeigt keine Unterschiede zu den SIF-Ableitungen von HyPlant.

Die Flächen mit negativen SIF-Werten können darüber hinaus mit fortgeschrittenen Reifestadien der Pflanzen im Zusammenhang stehen, die in Kapitel 4.3. beschrieben sind. Abgetrocknete Pflanzen sollten keine SIF-Emissionen anzeigen, da kein Chlorophyll mehr vorhanden ist. Die Flächen mit negativen SIF-Werten sind ausschließlich bei Pflanzen mit fortgeschrittener Reifestadium vorzufinden, was letztendlich ebenso für ein falsches Setzen des 0-Wertes spricht.

## 4.5. Eddy-Kovarianz

Ein weiteres Problem wird bei den abgeleiteten GPP-Werten ersichtlich. Hier wurde ein negativer Wert während des Überflugs am 2. August 2018 an der nördlichen Station abgeleitet. Negative GPP-Werte sind durch die Methode nach REICHSTEIN et al. (2005) durchaus möglich und werden mit der stochastischen Natur der Turbulenzen und dem Rauschen im Messsignal begründet (Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: o.S.).

Zudem kann die abgeleitete Respiration als zu groß angenommen werden, sodass es hier auch zu negativen GPP-Werten kommen kann. Laut Definition von GPP können die Werte nicht negativ ausfallen (Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: o.S.), wodurch es hier unter Betracht der geringen Stichprobengröße zu Problemen kommen kann. Wie bereits angemerkt können andere Methoden zur Ableitung von GPP genutzt werden (z.B: nach LASSLOP et al. (2010)), die wiederum andere Ergebnisse vorweisen können.

Die NEE- und GPP-Werte beider Stationen zeigen gegensätzliche Richtungen, was zu aller erst an der jeweiligen Definition festzuhalten ist, die NEE als Entnahme aus der Atmosphäre betrachtet und GPP als Zuwachs der Pflanze. An der nördlichen Station ist ein stetiger Rückgang der Werte zu erkennen, was hier mit dem erhöhten Reifegrad des Winterweizens zu begründen ist. Trotzdem erkennt man auch anhand der Ergebnisse der südlichen Station, dass die Messungen einen Tagesverlauf besitzen, da hier auch Schwankungen vorzufinden sind.

SCHICKLING et al. (2016) hat ebenfalls GPP für Winterweizen und Zuckerrüben anhand der EC-Methode abgeleitet. Die dortigen Ergebnisse sind für den 24. Juni (Winterweizen) und den 29. Juni (Zuckerrübe) können aufgrund der Zeitpunkte als Vergleich für die hier abgeleiteten Ergebnisse von fünf der sechs Überflüge dienen. So erkennt man lediglich eine Übereinstimmung der Werte am zweiten Überflug des 26. Juni, die bei ca.  $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  liegen. Die restlichen Werte werden im Vergleich unterschätzt. Dies könnte mit dem Dürrestress im Jahr 2018 zusammenhängen, der zu einem niedrigeren GPP führt und somit die niedrigen Werte erklärt. Die hier abgeleiteten Ergebnisse für die Zuckerrüben sind im Vergleich zu den Werten nach SCHICKLING et al. (2016) anfangs in einem plausiblen Wertebereich, während die Ableitungen am 29. Juni stärkere Abweichungen zeigen. Generell werden die Werte in dieser Arbeit allerdings unterschätzt, was, wie schon erwähnt, auf den Dürrestress zurückzuführen sein könnte.

#### 4.6. Footprints

Ebenso zeigt auch die Berechnung der Footprints fehlerhafte Daten. Da die Berechnungen innerhalb räumlicher Grenzen durchgeführt werden, stellen Footprints selten den kompletten Einflussbereich des gemessenen CO<sub>2</sub> dar. Aufgrund der Gesamtwerte (>100 %), die während des Überflugs am 27. Juni berechnet wurden, wurden diese für die weitere Berechnung ausgeschlossen. Die Methode der Footprintberechnung nach KORMANN & MEIXNER (2001) ist besonders abhängig von der Richtung und der Geschwindigkeit des Windes, sodass Windrosen während der Überflüge Hinweise auf mögliche Fehlerquellen geben. Hierfür stehen die Winddaten der Stationen zur Verfügung, die in 10-minütigen Intervallen gemessen wurden. Im Vergleich aller Windrosen (Abb. 19 und Abb. 20) erkennt man am besagten Termin ein eher diffuses Windverhalten mit unklarer Windrichtung und geringen Windgeschwindigkeiten, während die anderen Termine diese Kombination nicht aufweisen. Hinzu kommt, dass höhere Temperaturen zu einer labilen Schichtung der Atmosphäre beitragen, wodurch die hier angewandte Methode an ihre Grenzen stößt. Der hohe prozentuale Gesamtwert resultiert letztendlich aus simplen Rundungsfehlern, die auch bei den weiteren Footprints nicht ausgeschlossen werden können. Daneben erkennt man auch, wie die Footprints die Windverhältnisse widerspiegeln. So stimmen die gemessenen Windrichtungen mit den Footprints überein. Die größeren Footprints zeigen stärkere Windgeschwindigkeiten, während die kleineren Footprints auf langsamere Windgeschwindigkeiten zurückzuführen sind.

#### 4.7. Zusammenhang zwischen GPP und SIF

In den Ergebnissen wird die Korrelation zwischen GPP und SIF für die verschiedenen SIF-Produkte anhand von R<sup>2</sup>-Werten wiedergegeben und zeigen vielerlei unterschiedliche Resultate. Die nördliche Station zeigt bei F<sub>760</sub>, F<sub>Tot</sub> und F<sub>Ratio</sub> bei der Nutzung eines geringen Footprintanteils hohe R<sup>2</sup>-Werte, die sich mit zunehmendem Anteil verringern. Somit kann man darauf schließen, dass auch ein geringer Footprintanteil bei Winterweizen verhältnismäßig gut mit dem GPP des Winterweizens korreliert. Bei der Betrachtung der Footprints fällt auf, dass einige Footprints mit höheren Nutzungsanteil auch Pflanzen benachbarter Felder miteinschließen. Diese Felder weisen häufiger auch negative SIF-Werte auf, sodass diese die Ergebnisse der höheren Nutzungsanteile verfälschen könnten. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch mit höheren Anteilen eine bessere Korrelation vorhanden sein könnte.

Darüber hinaus erkennt man, dass bei der nördlichen Station keine Korrelation des GPP mit dem SIF-Produkt F<sub>687</sub> zu sehen ist, was vermuten lässt, dass dieses SIF-Produkt auch keine Verbindung

mit der Kohlenstoffakkumulation aufweist und somit unbrauchbar für diese Forschung sein könnte.

Die südliche Station zeigt im Gegensatz zur nördlichen kaum größere  $R^2$ -Werte, die den höchsten Wert mit 0,53 bei 33 % und 66 % des Footprints angibt. Hier könnte die zu kleine Feldgröße der ausschlaggebende Punkt sein, die dazu führt, dass die höheren Nutzungsanteile über die Feldgrenzen hinausgehen. Bei den Zuckerrüben könnte es sein, dass eine verstärkte Korrelation erst bei höheren Nutzungsanteilen vorhanden sein könnte.

Ebenso zeigt die Nutzung beider Stationen keine Korrelationen, die den höchsten  $R^2$ -Wert von 0,46 bei  $F_{\text{Ratio}}$  mit einem Nutzungsanteil von 90% anzeigt. Hier könnte der ausschlaggebende Punkt für die schwachen  $R^2$ -Werte bei den unterschiedlichen Pflanzenarten zu finden sein. Wie schon zu Beginn besprochen, weisen unterschiedliche Pflanzenarten ein unterschiedliches Verhalten in Bezug auf SIF und GPP auf, das zwar für jede Art einzeln bemessen werden kann, allerdings für eine Komposition unterschiedlicher Pflanzenarten mit dem Bestimmtheitsmaß nicht ermittelt werden kann. Die Steigung der linearen Regression, kann für die unterschiedlichen Pflanzenarten variieren, was sich letztendlich auf das Bestimmtheitsmaß des Gesamtdatensatzes auswirkt und diesen niedriger ausfallen lässt. Dieses Verhalten zeigt ZHANG et al. (2014), der die Carboxylierung von Sojabohnen und Mais mit SIF vergleicht. So erkennt man bei ZHANG et al. (2014) eine stetige Veränderung der Werte innerhalb der Vegetationsperiode, die hier bei Zuckerrübe und Winterweizen ebenfalls Unterschiede aufweist, was schon im Kapitel 4.3. ersichtlich ist. Da zum Zeitpunkt der Aufnahmen Winterweizen und Zuckerrüben in verschiedenen Stadien der Vegetationsperiode standen, ist die Vergleichbarkeit somit hinfällig.

## 5. Fazit

In dieser Arbeit wurden der Zusammenhang zwischen räumlich gewichteten Daten von SIF und GPP in Abhängigkeit unterschiedlicher Nutzungsanteile der EC-Footprints erforscht. Die Ergebnisse zeigen stärkere Korrelationen der Daten an der nördlichen Station bei der Nutzung geringerer Footprintanteile, die ein  $R^2$  bis zu 1 wiedergeben. Jedoch schwächen sich an dieser Station die  $R^2$ -Werte mit der Zunahme der Nutzungsanteile ab. Dies ist besonders bei den SIF-Produkten  $F_{760}$ ,  $F_{\text{tot}}$  und  $F_{\text{Ratio}}$  zu sehen, während die  $F_{687}$  keinen Zusammenhang anzeigt. Die südliche Station zeigen im Gegensatz dazu keine nennenswerten Korrelationen zwischen SIF und GPP, wo die höchsten  $R^2$ -Werte bei  $F_{\text{Ratio}}$  bei ca. 0,5 liegen. Sowohl die schwachen  $R^2$ -Werte der südlichen Stationen als auch die Abschwächung der bei erhöhten Footprintanteilen an der nördlichen Station können mit der zu geringen Feldgröße erklärt werden, in denen die Stationen installiert sind. Die höheren Footprintanteile überragen die Feldgrenzen, wodurch mehrere Pflanzenarten berücksichtigt werden müssen, die wiederum ein anderes Verhalten in Bezug auf SIF und GPP vorweisen und die Daten somit verfälschen.

Die schwachen  $R^2$ -Werte mit der kombinierten Nutzung beider Stationen könnte ebenfalls auf die Pflanzenkomposition zurückzuführen sein, Winterweizen und Zuckerrüben, wie schon angesprochen, sowohl unterschiedliche Verhaltensweisen in Bezug auf SIF und GPP vorweisen könnten als auch die Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Vegetationsperiode vorgenommen wurden.

Anmerken sollte man ebenfalls die geringe Stichprobengröße in dieser Studie, sodass man sich in diesem Punkt besser aufstellen sollte. Die generelle technologische Entwicklung mit HyPlant und dem FLEX-Satelliten kann die Stichprobengröße erweitern, sodass in zukünftigen Studien die Funktionalität der hier genutzten Methodik verifiziert werden kann.

## VII. Literaturverzeichnis

- AASEN, H., VAN WITTENBERGHE, S., SABATER MEDINA, S., DAMM, A., GOULAS, Y., WIENEKE, S., HUENI, A., MALENOVSKY, Z., ALONSO, L., PACHECO-LABRADOR, J., CANDRERO-MATEO, M.P., TOMELLERI, E., BURKART, A., COGLIATI, S., RASCHER, U., MAC ARTHUR, A. 2019. Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence II: Review of Passive Measurements Setup, Protocols, and Their Application at the Leaf to Canopy Level. *Remote Sensing* 11 (8), 972.
- AČ, A., MALENOVSKY, Z., OLEJNICKOVA, J., GALLE, A., RASCHER, U., MOHAMMED, G. 2015. Meta-Analysis assessing potential of steady-state chlorophyll fluorescence for remote sensing detection of plant water, temperature and nitrogen stress. *Remote Sensing of Environment* 168, 420 – 436.
- ALONSO, L., GOMZE-CHOVA, L., VILA-FRANCÉS, J., AMORÓS-LÓPEZ, J., GUANTER, L., CALPE, J., MORENO, J. 2008. Improved Fraunhofer Line Discrimination Method for Vegetation Fluorescence Quantification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 5 (4), 620 – 624.
- ARRIG, N., RANNIK, Ü., AUBINET, M., CARRARA, A., VESALA, T., PAPALE, D. 2017. Experimental validation of footprint models for eddy covariance CO<sub>2</sub> flux measurements above grassland by means of natural and artificial tracers. *Agricultural and Forest Meteorology* 242, 75 – 84.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2018. Entdecke das Land – Die kleine Fibel. URL: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Landfibel.pdf?\\_\\_blob=publicationFile,2018-12-05](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Landfibel.pdf?__blob=publicationFile,2018-12-05).
- BURBA, G., ANDERSON, D. 2010. A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications. LI-COR Biosciences, Lincoln.
- BURBA, G. 2013. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications. LI-COR Biosciences, Lincoln.
- CAMPBELL, J.B., WHYNNNE, R.H. 2011. Introduction to Remote Sensing. The Guilford Press, New York, London.
- Campbell, P.K.E., Middleton, E.M., Corp, L.A., Kim, M.S. 2008. Contribution of chlorophyll fluorescence to the apparent vegetation reflectance. *Science of the Total Environment* 404, 433 – 439.
- CANDRERO-MATEO, M.P., WIENEKE, S., DAMM, A., ALONSO, L., PINTO, F., MORENO, J., GUANTER, L., CELESTI, M., ROSSINI, M., SABATER, N., COGLIATI, S., JULITTA, T., RASCHER, U., GOULAS, Y., AASEN, H., PACHECO-LABRADOR, J., MAC ARTHUR, A. 2019. Sun-Induced Chlorophyll-Fluorescence III: Benchmarking Retrieval Methods and Sensor Characteristics for Proximal Sensing. *Remote Sensing* 11 (8), 962.

- CURDT, C. 2014. Design and Implication of a Research Data Management System: The CRC/TR32 Project Database (TR32DB). Dissertation. Universität zu Köln, Deutschland.
- CUSHMAN-ROISIN, B. 2019. Environmental Fluid Mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto.
- DAMM, A., ELBERS, J., ERLER, A., GIOLIS, B., HAMDI, K., HUTJES, R., KOSVANCOVA, M., MERONI, M., MIGLIETTAS, F., MOERSCH, A., MORENO, J., SCHICKLING, A., SONNENSCHNEIN, R., UDELHOVEN, T., VAN DER LINDEN, S., HOSTERT, P., RASCHER, U. 2010. Remote sensing of sun-induced fluorescence to improve modelling of diurnal courses of gross primary production (GPP). *Global Change Biology* 16, 171 – 186.
- DAMM, A., KNEUBÜHLER, M., SCHAEPMAN, M.E., RASCHER, U. 2012. Evaluation of Gross Primary Production (GPP) Variability over several Ecosystems in Switzerland using sun-induced Chlorophyll Fluorescence Derived from APEX Data. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Juli 22-27, 2012, München, Deutschland, 7133 – 7136.
- DRUSCH, M., MORENO, J. DEL BELLO, U., FRANCO, R., GOULAS, Y., HUTH, A., KRAFT, S., MIDDLETON, E.M., MIGLIETTA, F., MOHAMMED, G., NEDBAL, L., RASCHER, U., SCHÜTTEMAYER, D., VERHOEF, W. 2015. The Fluorescence Explorer Mission Concept – ESA’s Earth Explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 55 (3), 1273 – 1284.
- DUVEILLER, G., CESCATTI, A. 2016. Spatially downscaling sun-induced chlorophyll fluorescence leads to an improved temporal correlation with gross primary production. *Remote Sensing of Environment* 182, 72 – 89.
- EDER, F., SCHMIDT, M., DAMIAN, T., TRÄUMER, K., MAUDER, M. 2015. Mesoscale Eddies Affect Near-Surface Turbulent Exchange: Evidence from Lidar and Tower Measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 54 (1), 189 – 206.
- European Space Agency (ESA) 2015. Carbonsat FLeX - Report for Mission Selection. URL: [http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SP1330-2\\_FLEX.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SP1330-2_FLEX.pdf), 2019-10-17.
- FOKEN, T. 2006a. *Angewandte Meteorologie – Mikrometeorologische Methoden*. Springer, Berlin Heidelberg.
- FOKEN, T., WIMMER, F., MAUDER, M., THOMAS, C., LIEBETHAL, C. 2006b. Some aspects of energy balance closure problem. *Atmospheric Chemistry and Physics* 6 (12), 4395 – 4402.
- FOKEN, T., AUBINET, M., LEUNING, R. 2012. The Eddy-Covariance Method. In: AUBINET, M., VASELA, T., PAPALE, D. (Hrsg.), *Eddy Covariance – A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Springer, Heidelberg, London, New York, 1 – 16.
- FOKEN, T. 2013. Application of footprint models for wind turbine locations. *Meteorologische Zeitschrift* 22 (2), 111 – 115.

- FOKEN, T. 2017. *Micrometeorology*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Forschungszentrum Jülich 2019a. Klimastatistik – Jahresmittelwerte von 1961 – 2018. URL: [https://www.fz-juelich.de/gs/DE/UeberUns/Organisation/S-U/Meteorologie/klima/statistik\\_tabelle.html;jsessionid=512F208C072D429518328759B53A7FDC?nn=1223380](https://www.fz-juelich.de/gs/DE/UeberUns/Organisation/S-U/Meteorologie/klima/statistik_tabelle.html;jsessionid=512F208C072D429518328759B53A7FDC?nn=1223380), 2019-10-17.
- Forschungszentrum Jülich 2019b. Final Report - FLEX-US. URL [https://earth.esa.int/documents/10174/134665/FLEX-US\\_Final\\_Report](https://earth.esa.int/documents/10174/134665/FLEX-US_Final_Report), 2019-10-17.
- Forschungszentrum Jülich 2019c. Meteogramme von 1961 – 2018. URL [https://www.fz-juelich.de/gs/DE/UeberUns/Organisation/S-U/Meteorologie/klima/meteogr\\_node.html](https://www.fz-juelich.de/gs/DE/UeberUns/Organisation/S-U/Meteorologie/klima/meteogr_node.html), 2019-11-17.
- FRANKENBERG, C., BUTZ, A., TOON, G.C. 2011: Disentangling chlorophyll fluorescence from atmospheric scattering effects in O<sub>2</sub> A-band spectra of reflected sun-light. *Geophysical Research Letters* 38 (3), 1 – 5.
- GOMEZ-CHOVA, L., ALONSO-CHORDA, L., AMOROS-LOPEZ, J., VILA-FRANCES, J., DEL VALLE-TASCON, S., CALLPE, J., MORENO, J. 2006. Solar induced fluorescence measurements using field spectrometer. *Earth Observation for Vegetation Monitoring and Water Management*. November 10-11, 2005, Neapel, Italien, 274 – 281.
- GUANTER, L., ALONSO, L., GOMEZ-CHOVA, L., AMOROS-LOPEZ, J., VILA, J., MORENO, J. 2007. Estimation of solar-induced vegetation fluorescence from space measurements. *Geophysical Research Letters* 34 (8), 1 – 5.
- HEINTZE, J. 2019. Band 5: Quantenphysik – Wellen, Teilchen und Aome. In: Bock, P. (Hrsg.), *Lehrbuch zur Experimentalphysik*. Springer, Berlin.
- HOUT, Y., BABIN, M. 2010. Overview of Fluorescence Protocols: Theory, Basic Concepts, and Practice. In: SUGGEST, D.J., PRASIL, O., BOROWITZKA, M.A. (Hrsg.). *Chlorophyll a Fluorescence in Aquatic Sciences – Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 31 – 74.
- JANZEN, H.H. 2004. Carbon cycling in earth systems – a soil science perspective. *Agriculture Ecosystems & Environment* 104 (3), 399 – 417.
- Landesanstalt für Ökologie, Boden- und Forsten NRW (LÖBF) 2005. LÖBF-Mitteilungen: Natur und Landschaft in Nordrhein-Westfalen 2005. URL [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/veroeffentlichungen/loebf/loebf\\_mitteilungen/2005/loebfmit\\_200504.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/veroeffentlichungen/loebf/loebf_mitteilungen/2005/loebfmit_200504.pdf), 2019-11-27.
- LAMPEL, J., FRIEB, U., PLATT, U. 2015. The impact of vibrational Raman scattering of air on DOAS measurements of atmospheric trace gases. *Atmospheric Measurements Techniques* 8 (9), 3767 – 3787.

- LIU, H., PETERS, G., FOKEN, T. 2001. New Equations for Sonic Temperature Variance and Bouyancy Heat Flux with an Omnidirectional Sonic Anemometer. *Boundary-Layer Meteorology* 100, 459 – 468.
- LUSSEM, U., HERBRECHT, M. 2019: Land use classification of 2018 for the Rur catchment. CRC/TR5 Database (TR32DB). URL: <https://www.tr32db.uni-koeln.de/DOI/doi.php?doiID=112,2019-12-13>.
- MAIER, S.W., GÜNTHER, K.P. STELLMES, M. 2003. Sun-Induced Fluorescence: A New Tool for Precision Farming. In: VANTOAI, T., MAJOR, D., McDONALD, M., SCHEPERS, J., TARPLEY, L. (Hrsg.). *Digital Imaging and Spectral Techniques: Applications to Precision Agriculture and Crop Physiology*. American Society of Agronomy, Madison, 209 – 222.
- Max-Planck-Institut für Biogeochemie 2019: REddyProcWeb online tool. URL: <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWeb>, 2019-12-11.
- MAZZONI, M., AGATI, G., DEL BIANCO, S., CECCHI, G. MAZZINGHI, P. 2007. High Resolution Measurements of Solar Induced Chlorophyll Fluorescence in the Fraunhofer H<sub>α</sub> and in the atmospheric oxygen lines. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence*. Februar 7-9, Florenz, Italien.
- MERONI, M., ROSSINI, M., GUANTER, L., ALONSO, L., RASCHER, U., COLOMBO, R., MORENO, J. 2009. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment* 113 (10), 2037 – 2051.
- MOHAMMED, G.H., COLOMBO, R., MIDDLETON, E.M., RASCHER, U., VAN DER TOL, C., NEDBAL, L., GOULAS, Y., PEREZ-PRIEGO, O., DAMM, A., MERONI, M., JOINER, J., COGLIATI, S., VERHOEF, W., MELENOVSKY, Z., GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P., MILLER, J.R., GUANTER, L., MORENO, J., MOYA, I., BERRY, J.A., FRANKENBERG, C., ZARCO-TEJADA, P.J. 2019. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote Sensing of Environment* 231, 1 – 39.
- MUHS, D.R. 2007. Loess Deposits, Origins and Properties. In: Elias, S.A. (Hrsg.). *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, Amsterdam, Boston, 1405 – 1418.
- MURAOKA, H., NODA, H.M., NAGAI, S., MOTOHKA, T., SAITOH, T.M., NASAHARA, K.N., SAIGUSA, N. 2013. Spectral vegetation indices as the indicator of canopy photosynthetic productivity in a deciduous broadleaf forest. *Journal of Plant Ecology* 6 (5), 393 – 407.
- MURCHIE, E.H., LAWSON, T. 2013. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany* 64(13), 3983 – 3998.
- Ni, Z., LU, Q., HUO, H., ZHANG, H. 2019. Estimation of Chlorophyll Fluorescence at Different Scales: A Review. *Sensors* 19 (13), 1 – 22.

- PASQUILL, F. 1972. Some aspects of boundary layer description. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 98 (417), 469 – 494.
- PAW U, K.T., BALDOCHI, D.D., MEYERS, T.P., WILSON, K.B. 2000. Correction Of Eddy-Covariance Measurements Incorporating Both Advective Effects And Density Fluxes. *Boundary-Layer Meteorology* 97 (3), 487 – 511.
- PLASCYK, J.A. 1975. The MK II Fraunhofer Line Discrimination (FLD-II) for Airborne and Orbital Remote Sensing of Solar-Stimulated Luminescence. *Optical Engineering* 14 (4), 339 – 346.
- PLASCYK, J.A., GABRIEL, F.C. 1975. The Fraunhofer Line Discrimination MKII – An Airborne Instrument for Precise and Standardized Ecological Luminescence Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 24 (4), 306 – 313.
- RANNIK, Ü., PELTOLA, O., MAMMARELLA, I. 2016. Random uncertainties of flux measurements by the eddy covariance technique. *Atmospheric Measurements Techniques* 9 (19), 5163 – 5181.
- RASCHER, U., AGATI, G., ALONSO, L., CECCHI, G., CHAMPAGNE, S., COLOMBO, R., DAMM, A., DAUMARD, F., DE MIGUEL, E., FERNANDEZ, G., BRANCH, B., FRANKE, J., GERBIG, C., GIOLI, B., GOMEZ, J.A., GOULAS, Y., GUANTER, L., GUTIERREZ-DE-LA-CAMERA, O., HAMDI, K., HOSTERT, P., JUMINEZ, M., KOSVANOVA, M., LOGNOLI, D., MERONI, M., MIGLIETTA, F., MOERSCH, A., MORENO, J., MOYA, I., NEINIGER, B., OKUJENI, A., OUNIS, A., PALOMBI, L., RAIMONDI, V., SCHICKLING, A., SOBRINO, J.A., STELLMES, M., TOCI, G., TOSCANO, P., UDELHOVEN, T., VAN DER LINDEN, S., ZALDEI, A. 2009. CEFLES2: the remote sensing component to quantify photosynthetic efficiency from the leaf to the region by measuring sun-induced fluorescence in oxygen absorption band. *Biogeosciences* 6 (7), 1181 – 1198.
- RASCHER, U., ALONSO, L., BURKART, A., CILIA, C., COGLIATI, C., COLOMBO, R., DAMM, A., DRUSCH, M., GUANTER, L., HANUS, J., HYVÄRINEN, T., JULIETTA, T., JUSSILA, J., KATAJA, K., KOKKALIS, P., KRAFT, S., KRASKA, T., MATVEEVA, M., MORENO, J., MULLER, O., PANIGADA, C., PIKL, M., PINTO, F., PREY, L., PUDE, R., ROSSINI, M., SCHICKLING, A., SCHURR, U., SCHÜTTMEYER, D., VERRELST, J., ZEMEK, F. 2015. Sun-induced fluorescence – a new probe of photosynthesis: First maps from the imaging spectrometer HyPlant. *Global Change Biology* 21 (12), 4673 – 4684.
- REICHSTEIN, M., STOY, P., DESAI, A., LASSLOP, G., RICHARDSON, A. 2012. In: AUBINET, M., VASALA, T., PAPALE, D. (Hrsg.). *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 263 – 289.
- SCHMIDT, M., REICHENAU, T.G., FIENER, P., SCHNEIDER, K. 2012. The Carbon budget of a winter wheat field: An eddy covariance analysis of seasonal and inter-annual variability. *Agricultural and Forest Meteorology* 165, 114 – 126.

- Tereno 2019. Selhausen experimental test site. URL <https://www.tereno.net/joomla/index.php/observatories/eifel-lower-rhine-valley-observatory/selhausen-experimental-test-site>, 2019-11-27.
- VERHOEF, W., BACH, H. 2003. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment* 87 (1), 23 – 41.
- WEBB, E.K., PEARMAN, G.I., LEUNING, R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106 (447), 85 – 100.
- WIENEKE S. 2016. Remote sensing of red and far-red sun-induced chlorophyll fluorescence to estimate gross primary productivity and plant stress in sugar beet. Dissertation (veröffentlicht), Universität zu Köln, Deutschland.
- WIENEKE, S., AHRENDTS, H., DAMM, A., PINTO, F., STADLER, A., ROSSINI, M., RASCHER, U. 2018. Airborne based spectroscopy of red and far-red sun-induced chlorophyll fluorescence: Implications for improved estimates of gross primary productivity. *Remote Sensing of Environment* 184, 654 – 667.
- WILCZAK, J.M., ONCLEY, S.P., STAGE, S.A. 2001. Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* 99 (1), 127 – 150.
- WOHLFAHRT, G., GERDEL, K., MIGLIAVACCA, M., ROTENBERG, E., TATARINOV, F., MÜLLER, J., HAMMERLE, A., JULITTA, T., SPIELMANN, F.M., YAKIR, D. 2018. Sun-induced fluorescence and gross primary productivity during a heat wave. *Scientific Reports* 8, 1 – 9.
- ZHANG, Y., GUANTER, L., BERRY, J.A., JOINER, J., VAN DER TOL, C., HEUTE, A., GITELSON, A., VOIGT, M., KÖHLER, P. 2014. Estimation of vegetation photosynthetic capacity from space-based measurements of chlorophyll fluorescence for terrestrial biosphere models. *Global Change Biology* 20 (12), 3727 – 3742.

## VIII. Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne die Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

---

Köln, d. 17. Dezember 2019

(Peter Carsten Busch)

## IX. Anhang A

```
from osgeo import gdal, gdalconst #gdal version 2.4. or higher

import pandas as pd

from datetime import datetime

import numpy as np

beginning = str(datetime.now())

print('1. Start %s' %beginning)

#####

##### Information needed: Resolution(RES; Relation to input pixel height), NEE(Value of NEE or GPP during Flight),

##### Inputfile = Fluorescence, Referencefile = EC-Footprint, namingstuff

#####

RES = 0.01 #Resolution

GPP = 1.7408e-01

inputfile = "path of Fluorescence File"

referencefile = "path of Footprint File"

name = referencefile.split('/')

name = name[-1]

name = name.split('_')

name = name[0]+'_'+name[1]+'_'+name[2]

name2 = inputfile.split('/')

name2 = name2[-1]

name2 = name2.split('.')

name2 = name2[0]

print('2. Hier könnte ihre Werbung stehen!')

#####

##### Resampling des Fs-Tif

##### (https://stackoverflow.com/questions/7719651/how-can-i-change-the-resolution-of-a-raster-using-gdal)

#####

input = gdal.Open(inputfile, gdalconst.GA_ReadOnly)

x = input.RasterXSize

y = input.RasterYSize

print(' Input: %d x %d Pixel' %(x, y))

outputfile = "path of Subset.vrt"

gdal.Warp(outputfile, inputfile, xRes=RES, yRes=RES) #Dateigröße oder Auflösung?

print('3. Upsampling: done!')

#####
```

```

##### Anpassung des neuen Fs-Tif an den Footprint

##### https://stackoverflow.com/questions/10454316/how-to-project-and-resample-a-grid-to-match-another-grid-with-gdal-python

#####

inputfile = outputfile

input = gdal.Open(inputfile, gdalconst.GA_ReadOnly)

inputProj = input.GetProjection()

inputTrans = input.GetGeoTransform()

bandinput = input.GetRasterBand(1)

x = input.RasterXSize

y = input.RasterYSize

print(' Resampled: %d x %d Pixel' %(x, y))

reference = gdal.Open(referencefile, gdalconst.GA_ReadOnly)

referenceProj = reference.GetProjection()

referenceTrans = reference.GetGeoTransform()

bandreference = reference.GetRasterBand(1)

x = reference.RasterXSize

y = reference.RasterYSize

outputfile = "path of resample.tif"

driver= gdal.GetDriverByName('GTiff') #GTiff --> Geotiff (.tif), AAIGrid --> ASCII Grid (.asc)

output = driver.Create(outputfile,x,y,1,bandreference.DataType)

output.SetGeoTransform(referenceTrans)

output.SetProjection(referenceProj)

gdal.ReprojectImage(input,output,inputProj,referenceProj,gdalconst.GRA_Average)

output = gdal.Open(outputfile, gdalconst.GA_ReadOnly)

x = output.RasterXSize

y = output.RasterYSize

print(' Re-Resampled: %d x %d Pixel' %(x, y))

del output, outputfile, input, inputfile, referenceProj, referenceTrans

print('4. Downsampling and Alignment: done!')

#####

##### Raster to Table (as CSV-Output and Pandas-Dataframe)

#####

driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')

filename = referencefile

dataset = gdal.Open(filename)

band = dataset.GetRasterBand(1)

cols = dataset.RasterXSize

```

```

rows = dataset.RasterYSize

footdata = dataset.ReadAsArray()

filename = r"C:\Users\Carsten Busch\Documents\Master\Subset_resample.tif"

dataset = gdal.Open(filename)

resampleddata = dataset.ReadAsArray(

df = pd.DataFrame()

file = open('path of Results_' + name + '_' + name2 + '.csv',"w")

file.write('X; Y; Footprint; Fluorescence; Footprint and GPP;Fluorescence and Footprint \n')

countrows = 0

while countrows < rows:

    countcols = 0

    while countcols < cols:

        #print countrows, countcols

        GPPFoot = footdata[countrows, countcols] * GPP

        if footdata[countrows,countcols] > 100 or footdata[countrows,countcols] < -100 or footdata[countrows,countcols] == 0:

            countcols = countcols + 1

        else:

            df = df.append(pd.Series([countrows,

                countcols,

                footdata[countrows,countcols],

                resampleddata[countrows, countcols],

                GPPFoot,

                (footdata[countrows,countcols] * resampleddata[countrows, countcols]),

            ]), ignore_index = True)

            file.write('%d; %d; %s; %s; %s \n' %(countrows,

                countcols,

                str(float(footdata[countrows,countcols])),

                str(float(resampleddata[countrows, countcols])),

                str(float(GPPFoot)),

                str(float(((footdata[countrows,countcols]) * resampleddata[countrows, countcols]))

            )))

            countcols = countcols + 1

        countrows = countrows + 1

    file.write('\n')

#print(df.iloc[:,1])

#print(df.loc[1,:])

print('5. Table created: done!')

del filename, footdata, resampleddata

```

```

#####
##### Calculating some Statistics(Sum, Mean etc.)
#####

footprint = df[2]
fluo = df[3]
footGPP = df[4]
footfluo = df[5]

file.write('; Summe;; %s; %s; %s; %s \n' %(str(sum(footprint)),
    str(sum(fluo)),
    str(sum(footGPP)),
    str(sum(footfluo))
    ))

file.write('; Mittelwert;; %s; %s; %s; %s \n \n' %(str(np.mean(footprint)),
    str(np.mean(fluo)),
    str(np.mean(footGPP)),
    str(np.mean(footfluo))
    ))

print('6. Means and Sums calculated: done!')

#####
##### Calculating Values for 30%, 60%, 90% and 95% of the Footprint
#####

sort = np.argsort(footprint)

r = len(sort)

count = 0

countsort = -1

file.write('Percentage (Sum); GPP (Sum); Fluorescence (Mean) \n')

percent = 0.00

df2 = pd.DataFrame()

per = 10.00

while percent <= 0.33:

    ind = sort.iloc[countsort]

    percent = percent + footprint.iloc[ind]

    df2 = df2.append(pd.Series(df.iloc[ind,:]))

    countsort = countsort - 1

file.write(' %s; %s; %s \n' %(str(percent), str(sum(df2[4])), (str(np.mean(df2[5])))))

print('7.1. Calculated interesting Stuff for 33% of the Footprint')

while percent <= 0.5:

    ind = sort.iloc[countsort]

```

```

percent = percent + footprint.iloc[ind]
df2 = df2.append(pd.Series(df.iloc[ind,:]))
countsort = countsort - 1
file.write(' %s; %s; %s \n' %(str(percent), str(sum(df2[4])), str(np.mean(df2[5]))))
print('7.2. Calculated interesting Stuff for 50% of the Footprint')
while percent <= 0.66:
ind = sort.iloc[countsort]
percent = percent + footprint.iloc[ind]
df2 = df2.append(pd.Series(df.iloc[ind,:]))
countsort = countsort - 1
file.write(' %s; %s; %s \n' %(str(percent), str(sum(df2[4])), str(np.mean(df2[5]))))
print('7.2. Calculated interesting Stuff for 66% of the Footprint')
while percent <= 0.9:
ind = sort.iloc[countsort]
percent = percent + footprint.iloc[ind]
df2 = df2.append(pd.Series(df.iloc[ind,:]))
countsort = countsort - 1
file.write(' %s; %s; %s \n' %(str(percent), str(sum(df2[4])), str(np.mean(df2[5]))))
print('7.3. Calculated interesting Stuff for 90% of the Footprint')
while percent <= 0.95:
ind = sort.iloc[countsort]
percent = percent + footprint.iloc[ind]
df2 = df2.append(pd.Series(df.iloc[ind,:]))
countsort = countsort - 1
file.write(' %s; %s; %s \n' %(str(percent), str(sum(df2[4])), str(np.mean(df2[5]))))
print('7.4. Calculated interesting Stuff for 95% of the Footprint')
while percent <= 0.98:
ind = sort.iloc[countsort]
percent = percent + footprint.iloc[ind]
df2 = df2.append(pd.Series(df.iloc[ind,:]))
countsort = countsort - 1
file.write(' %s; %s; %s \n' %(str(percent), str(sum(df2[4])), str(np.mean(df2[5]))))
print('7.5. Calculated interesting Stuff for 98% of the Footprint')
file.write(' %s; %s; %s \n \n' %(str(sum(footprint)), str(sum(footGPP)), str(np.mean(df[5]))))
print('7.6. Calculated interesting Stuff for all of the Footprint')
file.write('Beginning;; %s \n' %beginning)
file.write('Ending;; %s \n' %str(datetime.now()))
file.close()

```