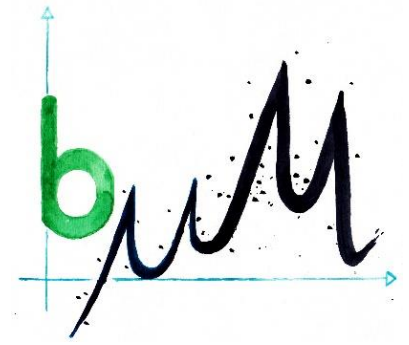


UNIVERSITÄT  
BAYREUTH



Bachelor of Science Geoökologie

---

AUSWIRKUNGEN DER DÜRRESOMMER  
2018 UND 2019 AUF DEN  
KOHLENSTOFF- UND WASSERHAUSHALT  
EINES FICHTENWALDES

---

Vorgelegt an der Universität Bayreuth, Lehrstuhl für  
Mikrometeorologie bei Dr. Wolfgang Babel (1. Prüfer)  
und Prof. Dr. Christoph Thomas (2. Prüfer)

Von Franziska Schwab  
Matrikelnummer: 1569480  
Bayreuth, 20. Juli 2021

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt.

---

(Ort, Datum)

---

(Unterschrift)

## Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Dr. Wolfgang Babel für das interessante Thema bedanken und für die gute Betreuung, bei der er mir immer mit seinem Rat und Wissen beigestanden hat. Außerdem möchte ich Prof. Dr. Christoph Thomas und dem gesamten Mikrometeorologie Team, welches auch mit neuen Ideen, Kritik und Anregungen geholfen hat das beste aus der Arbeit herauszuholen, danken.

Ebenso meiner Familie Mitbewohnerinnen und Freunden für ihre moralische Unterstützung und Motivation in der gesamten Studienzzeit.

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

<b>DI</b>	Dürreindex
<b>E<sub>pot</sub></b>	Potentielle Verdunstung
<b>ET</b>	Verdunstung
<b>F<sub>s</sub></b>	Mittlerer vertikaler Fluss
<b>GPP</b>	Brutto-Primärproduktion
<b>H</b>	Fühlbarer Wärmestrom (Teuling)
<b>NEE</b>	Netto-Ökosystemaustausch
<b>NPP</b>	Netto-Primärproduktion
<b>Q<sub>E</sub></b>	Latenter Wärmestrom
<b>Q<sub>Epot</sub></b>	Potentieller latenter Wärmestrom
<b>Q<sub>H</sub></b>	Fühlbarer Wärmestrom
<b>R<sub>a</sub></b>	Verfügbare Energie
<b>R<sub>eco</sub></b>	Respiration des Ökosystems
<b>s</b>	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
<b>S</b>	Konzentration der transportierten skalaren Größe
<b>T</b>	Transpiration
<b>TT</b>	Turbulenz Tower
<b>USA</b>	Ultraschallanemometer
<b>w</b>	Windgeschwindigkeit
<b>WUE</b>	Wassernutzunseffizienz
<b>β</b>	Bowen-Verhältnis
<b>λ<sub>ET</sub></b>	Latenter Wärmestrom (Teuling)
<b>ρ</b>	Luftdichte
<b>γ</b>	Psychrometerkonstante

## Zusammenfassung

Die Fichte (*Picea abies*) erlebt in Deutschland eine allgemeine Verschlechterung ihrer Standortbedingungen. Vor allem Dürre und steigende Temperaturen haben dabei große Auswirkungen. An dem Standort des untersuchten Fichtenbestandes Weidenbrunnen im Fichtelgebirge liefert ein Messturm meteorologische Messdaten. Auf dieser Datengrundlage sollen die Auswirkungen der Dürresommer 2018 und 2019 auf die Vegetation im Vergleich mit dem Jahr 2009, welches kein besonders heißes oder trockenes Jahr war, dargestellt werden. Vor allem die Trockenheit im Frühjahr 2018 birgt ein großes Risiko für irreversible Schäden an den Bäumen. Oder auch die direkte Aufeinanderfolge von zwei trockenen und heißen Jahren. Nach der Datenauswertung mit der Eddy-Kovarianzmethode und einer Aufarbeitung der Daten, wird zuerst anhand der Darstellung der Temperatur- und Niederschlagswerte der Unterschied der klimatischen Bedingungen zwischen dem Vergleichsjahr und den Jahren 2018 und 2019 deutlich dargestellt. Es zeigen sich in der Frühjahrestrockenheit allerdings noch keine Zeichen für eine Wasserlimitation. Dies wäre an einer Minderung der Verdunstung zu erkennen, da die Bäume als Reaktion auf eine zu geringe Wasserverfügbarkeit die Stomata an den Blattoberflächen schließen und somit weniger Flüssigkeit an die Atmosphäre abgeben und in dessen Folge weniger CO<sub>2</sub> aufnehmen können. Anders sieht es allerdings im Sommer aus. So zeigen sich 2018 deutliche Anzeichen einer Wasserlimitation. Es verdunstet deutlich weniger Wasser, als es bei den gegebenen Bedingungen theoretisch möglich wäre. Außerdem kommt es zu einem Einbruch der Brutto-Primärproduktion der Bäume, da die Pflanzen durch die Trockenheit weniger Kohlenstoff aufnehmen und zu Biomasse umwandeln können. Im Sommer 2019 sind die Ausmaße der Reaktionen auf den Trockenstress geringer ausgeprägt, obwohl es das zweite trockene Jahr in Folge ist. Mit einem starken Niederschlagsereignis Anfang September und damit einer kurzzeitig vorhandenen Wasserverfügbarkeit kann die Kohlenstoffaufnahme wieder hergestellt werden. Hier scheint die Vegetation also keine oder kaum irreversible Schäden erlitten zu haben. Der Frühling 2019 zeigt, anders als erwartet, kaum signifikante Folgen des vorhergehenden Dürre-Jahres. Sowohl die Verdunstung als auch die Kohlenstoffaufnahme spiegeln hier zwar die stärkere Trockenheit als im Jahr 2009 wider aber keine Spätfolge von 2018.

Also konnten bei dem untersuchten Bestand in Folge dieser zwei Jahre keine langfristigen Auswirkungen mit dem verwendeten Messsystem festgestellt werden und die Fichten haben hier noch gute Lebensbedingungen. Wenn sich das Klima allerdings weiterhin dahingehend entwickelt, dass die Sommer immer heißer und trockener werden und es zu weiteren Dürrejahren direkt aufeinander folgend kommt, wird auch dieser Standort langfristig für Fichten kaum mehr geeignet sein.

## Abstract

The spruce (*Picea abies*) is experiencing a universal deterioration of its site conditions. Droughts and increasing temperatures in particular significantly affect their vitality. The examined location is a spruce stock called "Weidenbrunnen", in Fichtelgebirge. There is a measurement tower which provides the measurement data that is used in this thesis. On a basis of this data, the effects of the drought-summer in 2018 and 2019 on the vegetation will be compared to the not dry and less hot year 2009. Especially the drought in spring 2018 might carry a high risk of irreversible damage to the trees. The succession of two dry years furthermore increases this risk. After the data analysis with the Eddy-Covariance method and reappraising, the data can graphically be presented. Variables like precipitation and temperature clearly show the difference of climate conditions between 2018/-19 and the comparison year. In spring-drought 2018 there are no real signs of water limitation. These signs would be a reduction of evaporation and CO<sub>2</sub> admission. Trees are able to close little openings on the leaf surface called "stomata" to reduce loss of water over the surface which also prevents CO<sub>2</sub> admission.

The conditions in summer look quite different. There are obvious signs of water limitation in summer 2018. The evaporation is clearly lower than theoretically possible with the given conditions. Also, there is a collapse of gross primary production because the trees cannot absorb CO<sub>2</sub> and produce biomass with closed stomata as effectively as before. In summer 2019 the reactions to drought are less pronounced although it is the second dry year.

A heavy precipitation event at the beginning of September causes a renewed water availability and the carbon uptake rises to a normal level. The vegetation seems to suffer no real irreversible damage. Differently than expected the spring 2019 does not show significant aftereffects of the previous drought year. The evaporation and the carbon absorption reflect the stronger drought as opposed to 2009 but long-term consequences of the year 2008 could not be observed.

In conclusion, the measured data of the examined spruce stock does not indicate long-term effects of the two years of drought and the trees still have good living conditions at this location. However, the climate is developing in a direction where drought-years could become more frequent as well as drier and hotter. With this development the location of the "Weidenbrunnen" spruce stock will not have suitable conditions for the trees in the long term.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	2
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....	3
Zusammenfassung .....	4
Abstract.....	5
1 Einleitung .....	7
1.1 Motivation.....	7
1.2 Theorie .....	8
1.3 Fragestellung und Ziele .....	9
2 Material und Methoden.....	13
2.1 Messstandort .....	13
2.2 Messinstrumente und Eddy-Kovarianzmethode .....	13
2.3 Datenbearbeitung.....	15
3 Ergebnisse .....	17
3.1 Klimatische Komponenten .....	17
3.2 Zeitreihen des latenten und fühlbaren Wärmestroms, der Brutto-Primärproduktion und des Nettoökosystemaustausches .....	19
3.2.1 Latenter Wärmestrom .....	19
3.2.2 Fühlbarer Wärmestrom .....	20
3.2.3 Nettoökosystemaustausch.....	21
3.2.4 Brutto-Primärprodukt .....	22
3.3 Indizes für Trockenstress .....	23
3.3.1 Bowen-Verhältnis.....	23
3.3.2 Dürreindex.....	24
3.4 Auswirkung auf Kohlenstoff, Wassernutzungseffizienz.....	25
4 Diskussion.....	26
4.1 Einordnung der untersuchten Jahre in die Klimahülle der Fichte.....	26
4.2 Auswirkungen der Trockenheit auf Kohlenstoff- und Wasseraustausch.....	27
4.2.1 Frühjahrstrockenheit im Jahr 2018 .....	27
4.2.2 Dürresommer .....	27
4.2.3 Carry-Over-Effekt im Frühling 2019 .....	28
4.3 Fehlerdiskussion.....	29
5 Schlussfolgerung .....	30
6 Literaturverzeichnis.....	31
Bildquellen .....	32
Anhang .....	33

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Natürliche Standorte der Fichte oder *Picea abies* sind in Deutschland bis auf wenige Ausnahmen ausschließlich im Hochgebirge und in Höhenlagen oberhalb der sogenannten Buchenstufe. Diese kleinflächigen Ausnahmen sind zum Beispiel spätfrostgefährdete Moorwälder und ähnliche lokalklimatisch kühl-feuchte Standorte (Kölling 2007). Dies deutet darauf hin, dass die Fichte bei kälteren Temperaturen optimale Verhältnisse hat. Vor allem in der Kälteperiode „kleine Eiszeit“ im Zeitraum von ca. 1300 bis 1900 erreichte der Fichtenbestand durch künstliche und natürliche Verbreitung große Ausmaße. Die bis heute ansteigenden Temperaturen und immer häufiger auftretenden Hitzesommer verschlechtern die Lebensbedingungen, verkleinern das Ausbreitungsgebiet der an Kälte angepassten Art und bringen die an Kälte angepasste Lebensgemeinschaft stark in Bedrängnis (Müller-Kroehling et al., 2009). In Abbildung 1 ist die Klimahülle der *Picea abies* gezeigt. Sogenannte Klimahüllen sind Darstellungen einer zwei-dimensionalen Häufigkeitsverteilung von der Jahresdurchschnittstemperatur und der Jahresniederschlagssumme. Es wird hierbei der Grad der Übereinstimmung mit der Klimahülle, in der für die Fichte gute Lebensbedingungen herrschen mit der des gegenwärtigen und modellhaften zukünftigen Klimas in Deutschland verglichen. Anhand der Graphik ist deutlich zu sehen, dass sich die Klimaverhältnisse in Deutschland so verändern

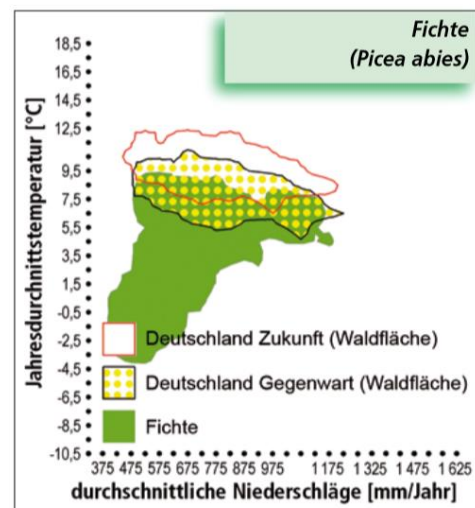


Abbildung 1: Klimahülle *Picea abies* (Kölling 2007)

werden, dass die Fichte einen immer kleineren Lebensraum haben wird. Man kann mit einer deutlich erhöhten Anfälligkeit der Fichtenwälder rechnen, deren Standortbedingungen sich nicht innerhalb der passenden Klimahülle befinden.

Die Fichte gehört zu den Flachwurzlern und kann bei länger anhaltender Trockenheit nicht auf tiefer liegendes Grundwasser zugreifen. Wenn der obere Boden ausgetrocknet ist, leidet die Fichte somit schnell unter Trockenstress.

In den betrachteten zwei Jahren (2018/ -19) waren die Sommer in Deutschland sehr warm und trocken, sodass man sie als Dürresommer bezeichnen kann. So war 2018 in Deutschland das bisher wärmste Jahr seit dem Beginn regelmäßiger Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881. 2019 erreichte mit einer Jahresmitteltemperatur von 10,3 °C Platz zwei der wärmsten bisher beobachteten Jahre (Friedrich et al. 2020). Mit einem mittleren Jahresniederschlag von 735 mm



in 2019 ordnet sich das Jahr als trockenes Jahr in die Klimazeitreihen ein. 2018 gilt mit nur 586,3 mm als extrem trockenes Jahr und ist das 4. -trockenste Jahr seit 1881 (Friedrich et al. 2019). Im Gegensatz dazu lag der Mittelwert des Niederschlags von 1961-1990 bei 788,9 mm. Vor allem in den Frühlings- und Sommermonaten fiel in beiden Jahren weniger Niederschlag als der langjährige Mittelwert (Friedrich et al. 2020). Im Jahr 2018 hat die Trockenperiode schon im Februar begonnen und hielt bis November an (Friedrich et al. 2019). Vor allem eine Frühjahrestrockenheit kann große Auswirkungen auf die Vegetation haben, wenn die Pflanzen in einer sensiblen Wachstumsphase unter Trockenstress leiden.

## 1.2 Theorie

Häufige und langanhaltende Trockenperioden haben einen großen Einfluss auf die hiesigen Ökosysteme. Die Trockenheit ist vor allem dann schädlich für Pflanzen, wenn sie so wenig Wasser zur Verfügung haben, dass der konstante Wasserstrom in den Leitbahnen nicht aufrechterhalten werden kann und abreißt. Wenn Böden zu trocken sind, um genügend Feuchtigkeit für die Versorgung der Bäume liefern zu können, wird das Wasser in den Leitelementen sehr hohen Zugspannungen ausgesetzt, was ein Abreißen der Wasserfäden verursachen kann. Dies führt zum Eindringen von Luft und in der Folge zu einer Blockade von Leitelementen, was zu einem häufig irreversiblen Schaden des Versorgungssystems führt (Choat et al. 2012).

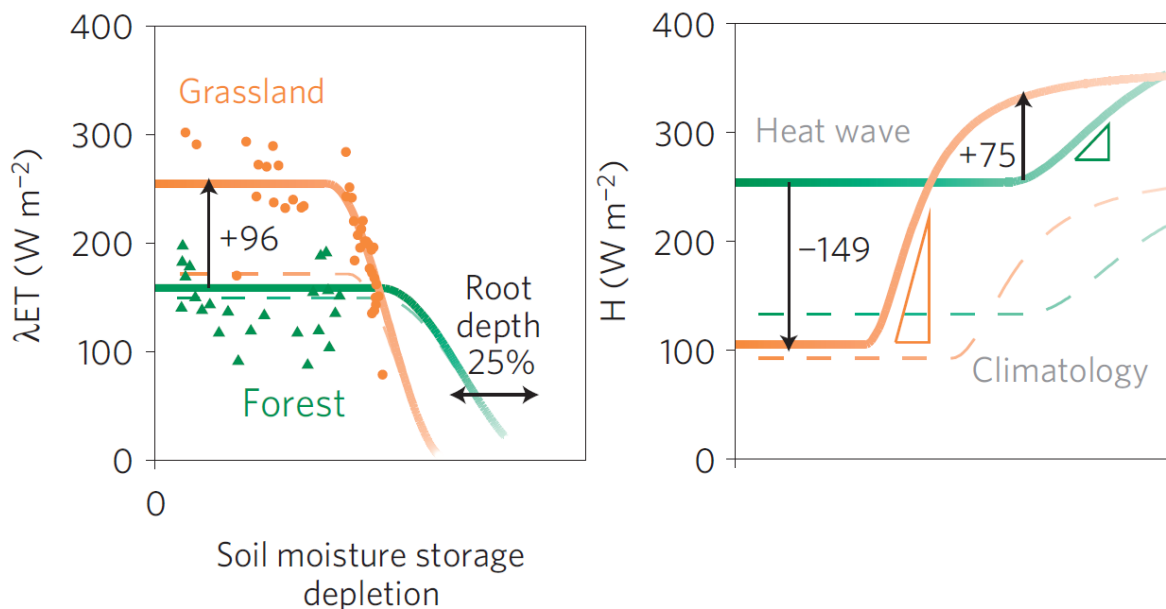


Abbildung 3 und Abbildung 2: Konzeptmodelle für die Verdunstung  $\lambda ET$  und die fühlbare Wärme  $H$  über Grünland und Wald während Trockenheit von Teuling et al. (2010)

Im Allgemeinen ist die Verdunstung eines Waldes im Jahresdurchschnitt höher als beispielsweise die einer Grasfläche. Dies ist in Abbildung 3 und Abbildung 2 von (Teuling et al. 2010) bei einem Vergleich von Grünland zu einem Wald im Sommer 2003 dargestellt.

Das kommt durch unterschiedliche Strategien, die im Laufe der Evolution entwickelt wurden um der Trockenheit standzuhalten (Zhang et al. 2001). Wie zum Beispiel kleine Öffnungen an der Blattoberfläche, die den Stoffaustausch zwischen Pflanze und Atmosphäre regulieren können. Bei einer ausreichenden Wasserversorgung nimmt die Pflanze den Wasserverlust durch die Verdunstung über die Stomata aufgrund der Notwendigkeit der Aufnahme des Kohlenstoffs in Kauf. Um sich vor Austrocknung zu schützen, wird der stomatäre Widerstand erhöht. Damit wird der Wasserverlust reguliert, wodurch es aber zu einer Hemmung der CO<sub>2</sub>-Aufnahme kommt. Außerdem wird über die Wurzeln Wasser aus tieferen Bodenschichten transportiert, um den Fluss in den Leitbahnen zu erhalten. Dies verringert erstmal die Verdunstung an den Blättern und hält diese für eine längere Zeitspanne aufrecht. Trotz Trockenheit bleibt die Verdunstung auf einem geringeren Niveau zunächst gleich und sinkt erst bei Erschöpfung des Bodenfeuchtereservoirs und damit auch einer Schädigung der Bäume deutlich ab (Teuling et al. 2010). Mit der geringeren Verdunstung steigt die Temperatur in den Baumkronen deutlich an, da ein Teil der fühlbaren Wärme nicht mehr durch die Verdunstung in latente Wärme umgewandelt wird. Nadelwälder und besonders Fichtenwälder reagieren deutlich auf länger anhaltende Trockenperioden, da sie den Wasserhaushalt des Bestandes stark über die Stomata regeln. Der Kohlenstoffhaushalt korreliert deutlich mit der Regelung der Verdunstung über die Porenöffnungen in den Blättern. Bei limitierter Wasserverfügbarkeit werden die Stomata geschlossen um die Transpiration zu minimieren, dabei kann kaum noch CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft mehr aufgenommen werden (Hetsch und Heilig 1981). Das CO<sub>2</sub> ist jedoch essentiell um im Prozess der Photosynthese zusammen mit Wasser und Energie aus dem Sonnenlicht Glucose und O<sub>2</sub> zu bilden und somit bestimmend für die Netto-Primärproduktion (NPP) (Klosterhalfen et al. 2019). Wenn die Stomata geschlossen und kein CO<sub>2</sub> aufgenommen und umgesetzt wird, kann die Pflanze deutlich weniger effektiv Photosynthese betreiben (Ciais et al. 2005). CO<sub>2</sub> ist in der Atmosphäre als Spurengas in geringen Mengen vorhanden (ca. 0,04 %) und somit verliert die Pflanze bei geöffneter Stomata erheblich mehr Wassermoleküle als sie CO<sub>2</sub> Moleküle aufnimmt. Hinzu kommt, dass Fichten eher flachwurzelnende Bäume sind und somit die Wurzeln meist nicht bis zum Grundwasser reichen, sodass die Wasserversorgung auch durch diesen Weg in Trockenperioden nicht gewährleistet ist. Es soll hier unter anderem anhand Daten zur Evaporation (ET) und dem Netto-Ökosystem-Austausch (NEE) gezeigt werden inwiefern Anzeichen für Stress, verursacht durch die Trockenheit, erkennbar sind (Müller-Kroehling et al. 2009).

### 1.3 Fragestellung und Ziele

In dieser Arbeit soll es um den Kohlenstoff- und Wasserhaushalt des Fichtenbestandes während der Dürresommer 2018/2019 gehen und ob man eine signifikante Änderung des Kohlenstoffaustausches zwischen Fichte und der Atmosphäre aufgrund der Trockenheit

erkennen kann. Hierbei soll auch besonders darauf geachtet werden, ob sich vor allem die Frühjahrstrockenheit stärker auswirkt. Wichtig zu betrachten ist auch, ob im Jahr 2019 ein so genannter Carry-Over-effekt von dem bereits vorherigen trockenen Jahr 2018 eintritt und inwieweit sich der Kohlenstoffaustausch der beiden trockenen Jahren von dem eines Jahres unterscheidet, welches einen durchschnittlichen Jahresniederschlag hat. Dieser Vergleich wird sich hier auf das Jahr 2009 beziehen.

Mithilfe der Eddy-Kovarianzmethode wird vor allem der  $CO_2$  – und Wasseraustausch über die Baumkronen mit der umgebenden Luft beobachtet. Hier ist der saisonale Verlauf der ET wichtig, da anhand dessen die Reaktion der Bäume auf die Trockenheit gut dargestellt werden kann. Ein Einbruch der Verdunstung ist auch ein Anzeiger für eine Störung des Wasserkreislaufes der Bäume. Hierbei wird für die Analyse, die aus der Eddy-Kovarianz erhaltene ET verwendet. In der gesamten ET wird beispielsweise die Verdunstung über die Bodenoberfläche oder eine Verdunstung über das Unterholz und niedrige Pflanzen mit betrachtet.

Für diese Arbeit sind folgende Messgrößen wichtig:

Die potentielle Verdunstung  $E_{pot}$  ist die berechnete theoretisch mögliche Verdunstung für eine gut mit Wasser versorgte, vegetationsbedeckte Landoberfläche. Diese wird mithilfe der Formulierung für die Verdunstung nach Priestley und Taylor bestimmt (Priestley CHB und Taylor RJ 1972).

$$E_{pot} = 1,25 \cdot \frac{s}{s + \gamma} \cdot R_a$$

Mit der verfügbaren Energie  $R_a$  , die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve  $s$  und die Psychrometerkonstante  $\gamma$

Die Brutto-Primärproduktion (GPP), also die gesamt Bildung von organischer Substanz aus anorganischen Stoffen mithilfe der vorhandenen Strahlungsenergie in der Photosynthese ergibt sich aus der Messung des Nettoökosystemaustausch (NEE) von  $CO_2$  und der Respiration des Ökosystems  $R_{eco}$  (Ruppert et al. 2006). Der NEE wird angenommen als der vorhandene  $CO_2$  Fluss und wurde durch die Eddy-Kovarianzmethode ermittelt. GPP und  $R_{eco}$  sind durch eine Aufteilung des Flusses modelliert.

$$GPP = NEE - R_{eco}$$

Die Kopplung des Wasser- und Kohlenstoffflusses geschieht durch die Wassernutzungseffizienz WUE, welche durch das Verhältnis aus der Photosyntheseleistung und der Verdunstung definiert ist. Aus der Verdunstung und GPP also die Aufnahme an  $CO_2$  pro Verlust an Wasser der Pflanze ergibt sich also die Wassernutzungseffizienz: (Beer et al. 2009).

$$WUE = \frac{GPP}{ET}$$

Es soll die Auswirkung der Trockenheit auf den Fichtenbestand betrachtet werden. Hier ist zu erwarten, dass durch die Schließung der Stomata aufgrund der Wasserlimitation zwar weniger Wasser verdunstet aber auch eine geringere Menge an  $CO_2$  aufgenommen wird und somit die GPP deutlich sinkt. Der Wert der WUE könnte somit erstmal leicht sinken, da die Fichten die Wasserverfügbarkeit durch den Wassertransport aus den Wurzeln weiter aufrechterhalten können. Wenn allerdings nicht genügend Wasser im Boden vorhanden ist und eine Wasserlimitation eintritt, ist die WUE wieder vergleichbar zur Ausgangssituation. Dann müssen andere Trockenheitsindizes wie der Dürreindex betrachtet werden.

Dieser setzt sich aus dem Verhältnis des latenten Wärmestroms  $Q_E$  und des potentiellen latenten Wärmestroms  $Q_{Epot}$  zusammen, welcher Auskunft über den Trockenstress für die Pflanzen gibt.

$$DI = \frac{Q_E}{Q_{Epot}}$$

Wenn beispielsweise  $Q_{Epot}$  deutlich größer ist als  $Q_E$  ist anzunehmen, dass es zu Austrocknung bei den Bäumen kommt und nicht genügend Wasser im Boden verfügbar ist um die Funktionsfähigkeit der Photosynthesereaktion aufrecht zu erhalten.

Je nachdem wie viel Wasser verfügbar ist, verändert sich das Bowen-Verhältnis  $\beta$ . Je größer der fühlbare Wärmestrom im Vergleich zum latenten Wärmefluss desto größer ist das Verhältnis (Rebmann 2003) . Bei einer zu geringen Wasserverfügbarkeit und der damit geringeren Verdunstung in den Baumkrone steigt das Bowen-Verhältnis und ist somit ein Zeichen für Trockenstress.

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E}$$

Dieses Verhalten kann man auch jeweils in den Sommern 2018/-19 erwarten. Wobei die Austrocknung 2019 noch früher als 2018 zu erwarten ist, da es das zweite trockene Jahr in Folge ist und sich der Wald von der Trockenheit nicht erholen konnte, sodass es schon im Frühling eine Wasserlimitation geben wird.

Es wird also eine relativ gleichbleibende Verdunstung bis zur Erschöpfung der Bodenfeuchte geben. Sobald die Austrocknung beginnt wird das an einem Einbruch der Verdunstung und einem Anstieg der fühlbaren Temperatur erkennbar sein. Trockenheit als Störung des Wasserkreislaufes in Bäumen führt auch zu einem geringeren NEE und dessen verknüpften Komponenten wie das GPP (Heinzelmann 2019). Der fühlbare Wärmestrom wird einen deutlich

größeren Anteil einnehmen als der latente Wärmestrom. Irreversible Trockenschäden an der Vegetation wird man zusätzlich vor allem im Folgenden Jahr an einer grundsätzlich geringeren Kohlenstoffaufnahme sehen. Beziehungsweise vor allem im Frühling, da der Bestand erst im Laufe der Vegetationsperiode die Möglichkeit hat die Schäden auszugleichen.

Hier ist vor allem die saisonale Variabilität der Werte wichtig für diese Arbeit und ob man Auffälligkeiten bei besonderen Wettersituationen also die lange Trockenperiode in den beiden Sommern oder im Jahr 2018 insbesondere bei der Frühjahrstrockenheit erkennen kann. Auch die Korrelation der Verdunstung mit der Kohlenstoffaufnahme ist hier wichtig zu betrachten.

Es werden die Daten der Sommermonate von 2018 und 2019 ausgewertet werden und mit Daten aus dem Jahr 2009 verglichen, da dies kein auffällig trockenes Jahr war und keine außergewöhnliche Trockenperiode im Sommer und auch nicht im Frühjahr vorhanden war. Hierbei ist es noch interessant den NEE der beiden Sommer 2018/-19 zu vergleichen, ob im Jahr 2019 auffällige Auswirkungen des vorangegangenen trockenen Sommers zu sehen sind.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Messtandort

Der Standort des Messturms liegt im Fichtelgebirge im Nordosten Bayerns auf nordöstlich des Großen Waldsteins und südwestlich Bergkopfes im Bestand Weidenbrunnen (50° 08' 31" N, 11° 52' 01" E). Der 36 m hohe Turm steht auf einer Höhe von 775 m über NN in einem Fichtenbestand. Hierbei ist auch wichtig zu wissen, dass sich südlich des Standortes hangabwärts ein vor ein paar Jahren neu aufgeforstetes Gebiet befindet, in dem die Baumhöhe deutlich niedriger ist. Das beeinflusst die Luftströmungen und Wirbel im umliegenden Bereich und muss in der Bewertung der Messdaten beachtet werden.



Abbildung 4: „Turbulence Tower“ (TT) am Waldstein (Foken 2017)



Abbildung 5: Standort des TT mit neu aufgeforstetem Gebiet

### 2.2 Messinstrumente und Eddy-Kovarianzmethode

In der atmosphärischen Grenzschicht finden sehr wichtige Stoff- und Energieflüsse statt. Hierbei ist Turbulenz der Hauptmechanismus für den vertikalen Transport von Energie und Spurenstoffen (Rebmann 2003). Die Eddy-Kovarianzmethode ist eine Methode zur Messung der vertikalen turbulenten Flüsse in der beobachteten Luftschicht. Hiermit wird der CO<sub>2</sub>-Fluss und Austausch im Ökosystem und der Atmosphäre und somit der NEE ermittelt.

Mit einem Metek USA Ultraschallanemometer wird die Windgeschwindigkeit und -richtung bestimmt. Durch die Messung in drei verschiedene Richtungen bekommt man ein dreidimensionales Bild des Windes.

Mit einem Infrarot-Gasanalysator wird zeitgleich die Wasserdampf- und Kohlendioxidkonzentration in der Luft gemessen. Dazu wird Infrarotstrahlung durch eine Kammer geschickt, in der sich das zu untersuchende Gas befindet. Also in diesem Fall die angesaugte Umgebungsluft (Aubinet et al. 2012).

Auf dem Turm befindet sich auf 36 m Höhe ein Metek USA Ultraschallanemometer, ein Li7500 open path, und ein Li7000 closed path  $CO_2$  und  $H_2O$  Analyzer. Diese Messsysteme liefern die Daten für 2018 und 2019 und auch die Vergleichsdaten von 2009. Allerdings war im Jahr 2009 nur das Li7500 open path in Betrieb und das Metek USA war zu dieser Zeit ein unbeheiztes Modell.

Die Niederschlagsdaten sind Messungen vom "Pflanzgarten", Waldstein mit einem Regenschirm mit Kippbehälter in 1m Höhe. Fehlende Niederschlags-Daten sind mit Daten von der DWD Station Fichtelberg-Huettstadt vervollständigt.

Damit wird der vertikale turbulente Fluss ermittelt. Die Bestimmung dessen beruht auf einigen grundsätzlichen Gleichungen wie den Navier-Stokes-Gleichungen, der Kontinuitätsgleichung, der Gasgleichung sowie dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Der mittlere vertikale Fluss bezeichnet die Rate, mit der ein definiertes Luftpaket mit bekannten Eigenschaften durch eine bekannte horizontale Einheitsfläche hindurch geht. Dies ist folgendermaßen definiert:

$$F_S = \overline{\rho w S}$$

Mit dem mittleren vertikalen Fluss  $F_S$ , der Luftdichte  $\rho$ , der vertikalen Windgeschwindigkeit  $w$  und der Konzentration der transportierten skalaren Größe  $S$ .

Wenn die Reynolds-Zerlegung (Aubinet et al. 2012) angewendet wird erhält man:

$$F_S = \overline{(\bar{\rho} + \rho')(\bar{w} + w')(\bar{S} + S')}$$

Wobei der Überstrich für einen zeitlichen Mittelwert und ' für eine momentane Abweichung steht. Wichtig ist das zeitliche Mittel so zu wählen, dass die Frequenzen der Messungen damit übereinstimmen. Nach dem Ausmultiplizieren der Gleichung mit der Annahme  $\frac{\rho'}{\bar{\rho}} \ll 1$  gilt folgende Gleichung:

$$F_S = \bar{\rho} \bar{w} \bar{S} + \overline{\rho' w' S'}$$

Unter homogenen Bedingungen, das heißt bei einem ausreichend großen Gelände ohne Hindernissen kann der mittlere vertikale Transport als null angenommen werden. Damit gilt:

$$F_S = \overline{\rho w' S'}$$

Mit dieser Formel wird nun in der Eddy-Kovarianzmethode gearbeitet (Aubinet et al. 2012). Hierbei muss als Voraussetzung eine Stationarität der Größen herrschen. Das heißt, dass sich die Messgrößen der Windgeschwindigkeitskomponenten und Größen wie Temperatur und Konzentration von Luftbeimengungen über einen Mittelungszeitraum nicht verändern dürfen (Rebmann 2003).

## 2.3 Datenbearbeitung

Die Berechnung der CO<sub>2</sub> – Flüsse und der ET erfolgte in Matlab mit der Eddy-Kovarianz Software „bmmflux“, welche von Prof. Christoph Thomas geschrieben wurde. Das bmmflux-Programm ermöglicht eine benutzerdefinierten Konfiguration der plausiblen Wertebereiche der Eingangsdaten. Es wurden für eine Mittelungszeit von 30 Minuten die Kovarianzen der 10 Hz Daten berechnet und korrigiert (Thomas et al. 2009). Die Auswertung der Daten erfolgte mit der Statistik Software R, Version 3.6.2 (RCore Team 2019). In diesem Programm wurden unplausible Messwerte identifiziert, physikalische Limits festgelegt und die Daten Qualitätsgeprüft. Fehlende Werte des open-path Messgeräts wurden mit Werten des closed-path Messgerät aufgefüllt (Anhang Abbildung 18) . Es wurde auch mit Matlab eine sogenannte Gapfilling-Routine auf die Daten angewendet, um Lücken in den Daten aufzufüllen und den gemessenen CO<sub>2</sub> – Fluss (NEE) in GPP und R<sub>eco</sub> aufzuteilen.

Da die Berechnung der E<sub>pot</sub> nach Priestley-Taylor eine Näherung der Prozesse am Tag ist und nicht für die Werte in der Nacht angewendet werden kann, wurden diese Werte nachts auf null gesetzt. Hierbei wurde ab einer Globalstrahlung von unter  $10 \text{ W m}^{-2}$  angenommen, dass die potentielle Verdunstung Null ist. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit und zur Vermeidung von rechnerischen Fehlern wurde dieser Filter auch auf die Daten von ET und DI angewendet, wobei hier die Werte ausgeschlossen wurden. Bei der GPP wurden die Werte null gesetzt, da hier eine kumulative Darstellung genutzt wird.

Auch wurden die halbstündigen Messwerte zu Tageswerten zusammengefasst. Hierzu wurde jeweils die Summe aller Werte eines Tages gebildet und dann in die jeweils passende Einheit pro Tag umgerechnet.

Außerdem wurde die Vegetationsperiode, motiviert an den NEE – Messungen für die folgende Betrachtung der Ergebnisse definiert als einen Zeitraum von März bis November. Dies korrespondiert mit dem Zeitraum, in dem der Lichtkompensationspunkt erreicht ist, das heißt die GPP wird stärker als R<sub>eco</sub>. In diesem Fall ist NEE < 0.



Die Jahreszeiten wurden den meteorologischen Konventionen definiert: Als Winter werden die Monate Dezember, Januar und Februar gewertet. Frühling ist März, April und Mai; Sommer Juni, Juli und August; Herbst September, Oktober und November.

### 3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Datenauswertung veranschaulicht und beschrieben.

#### 3.1 Klimatische Komponenten

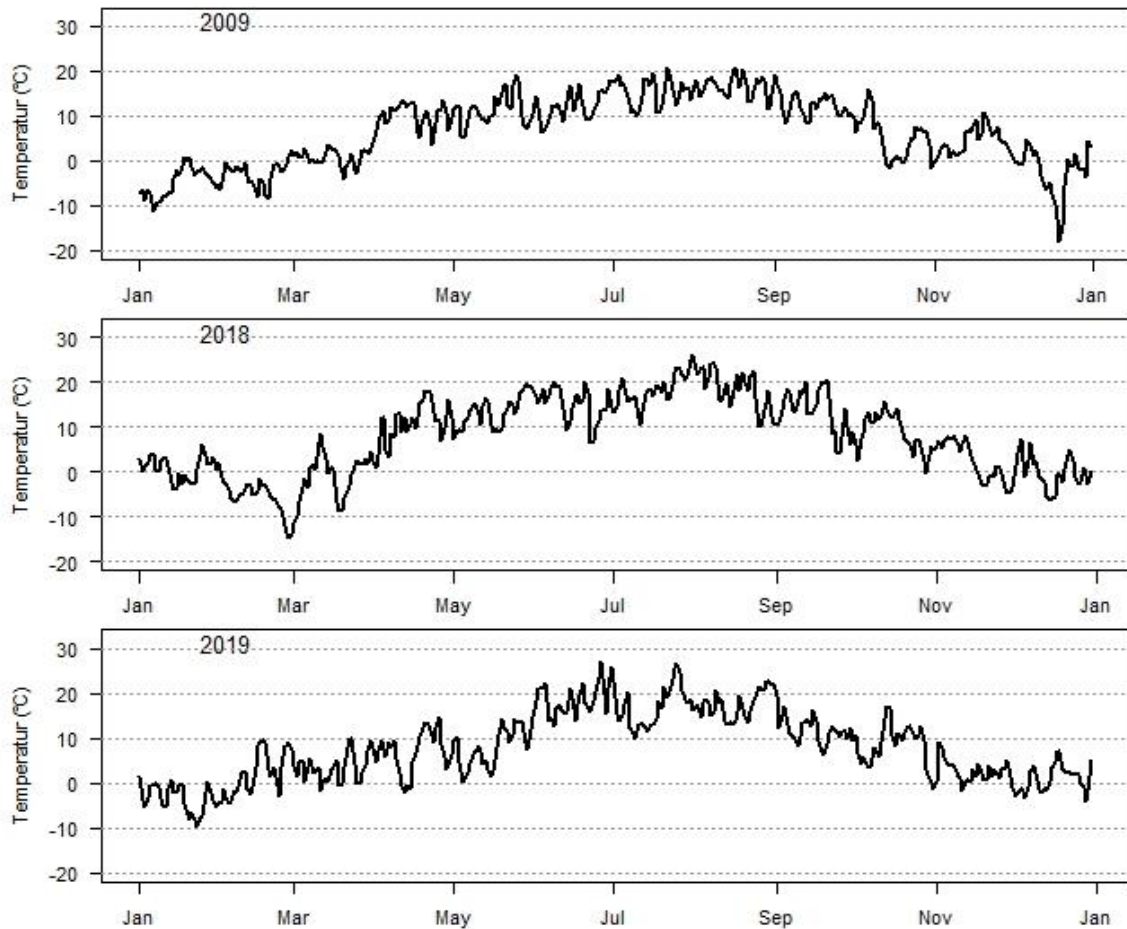


Abbildung 6: Tagesmittelwerte der Temperatur in °C

In Abbildung 6 ist jeweils die Tagesmitteltemperatur dargestellt. Im Jahr 2009 liegen die Tagesmitteltemperaturen bis Anfang April überwiegend unter 0 °C, vor allem in 2019 ist die Temperatur deutlich früher über 0°C. Die Höchstwerte werden von Juli bis August erreicht. Wenn die Jahresverläufe miteinander verglichen werden ist gut erkennbar, dass die Tagesmitteltemperatur in den Sommermonaten in den Jahren 2018 und -19 erkennbar höher sind, als die des Vergleichsjahres. Ein „Sommertag“ ist definiert als  $T_{\max} > 25\text{ °C}$ . Das heißt, wenn die maximale Temperatur an einem Tag über 25°C erreicht, ist es ein Sommertag. 2009 gab es 2 solcher Tage. 2018 überschritt die Temperatur an 28 Tagen diesen Grenzwert und 2019 an 26 Tagen. 2019 sind die wärmsten Tage auch schon früher im Jahr. Hier werden die Höchstwerte bereits im Juni erreicht. Auch im Herbst bleibt die Temperatur in den Dürrejahre höher, während 2009 eine stärkere Abnahme stattfindet.

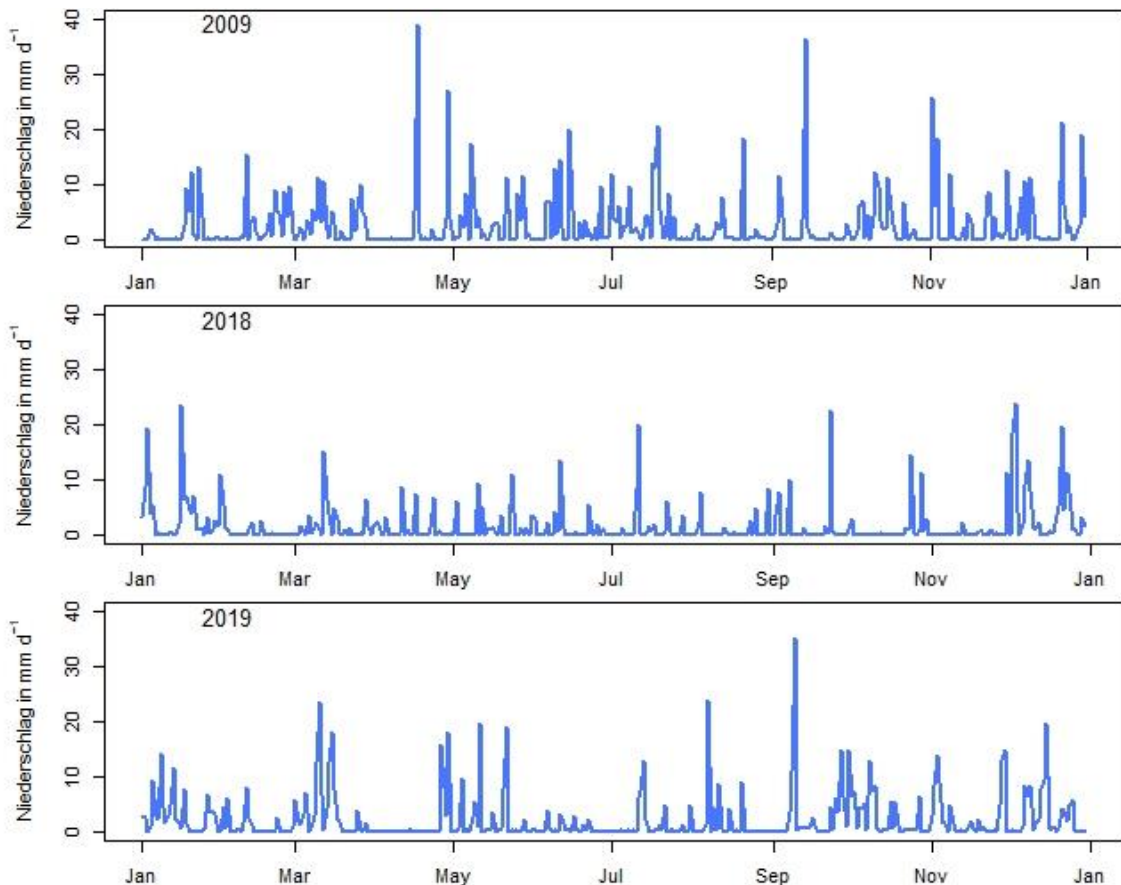


Abbildung 7: Niederschlagswerte in mm pro Tag

Die in Abbildung 7 dargestellten Niederschlagswerte zeigen ein nahezu gegenteiliges Bild zu den Temperaturen. Hier werden 2009 höhere Niederschlagswerte erreicht. Die stärksten Niederschlagsereignisse ereignen sich im April und September. In den Frühjahrs- und Sommermonaten finden regelmäßige Niederschlagsereignisse statt. Im Jahr 2018 ist auffallend, dass vor allem im Februar und auch im Frühling die Niederschlagswerte sehr gering sind und auch über den Sommer nicht bemerkenswert zunehmen. Der Herbst fiel ebenso sehr niederschlagsarm aus. Der Frühling 2019 beginnt im Vergleich zu den anderen Jahren mit erstmal recht hohen Werten, doch ab Mitte März bis Ende April fällt fast kein Regen mehr. Auch der Sommer ist eher trocken. Ab August häufen sich die Niederschläge wieder, jedoch mit einer vergleichsweise geringen Intensität. Auffallend ist auch, dass Anfang September 2019 ein recht starkes Niederschlagsereignis, wodurch die Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen kurzfristig hoch ist. Generell ist die Niederschlagsintensität 2019 deutlich variabler als im Jahr 2018.

## 3.2 Zeitreihen des latenten und fühlbaren Wärmestroms, der Brutto-Primärproduktion und des Nettoökosystemaustausches

### 3.2.1 Latenter Wärmestrom

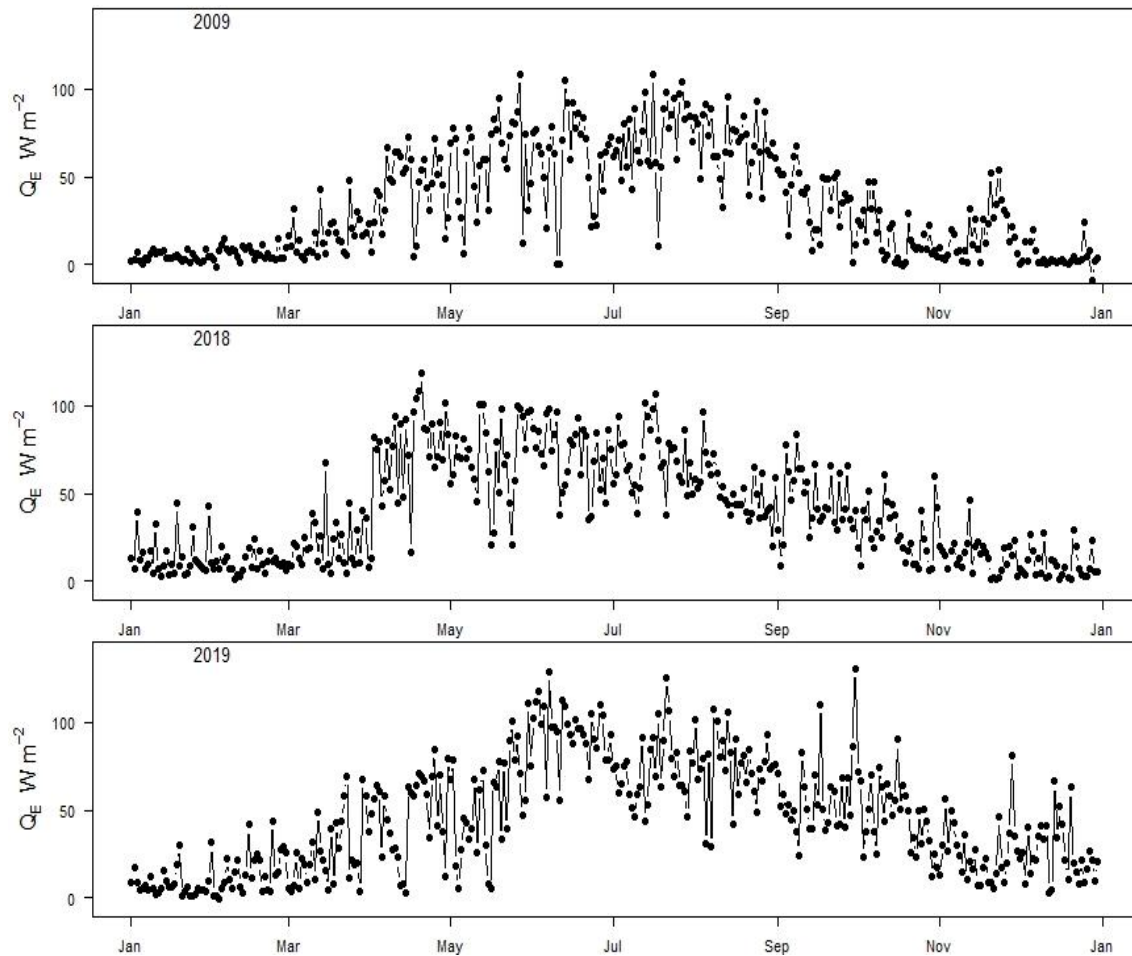


Abbildung 8: Tagesmittelwerte des latenten Wärmestroms  $Q_E$

In den latenten Wärmestrom  $Q_E$ , der mithilfe der Kovarianzmethode gemessen und korrigiert wurde, gehen alle Verdunstungsprozesse des Ökosystems ein. Deshalb kann man ihn auch als Evapotranspiration bezeichnen. Die Verdunstung reagiert auf die Energieverfügbarkeit und Bedingungen der Atmosphäre wie Trockenheit, die Stärke des Windes oder der Grad an Bewölkung. Auf den fehlenden Niederschlag wird die Verdunstung erst reagieren, wenn kein pflanzenverfügbares Wasser mehr da ist. Das Jahr 2009 ist das niederschlagsreichste Jahr, welches vor allem in den Sommermonaten eher niedrigere Werte aufzeigt. Im Herbst fällt in den Jahren 2018 und 2019 die Kurve flacher ab.

### 3.2.2 Fühlbarer Wärmestrom

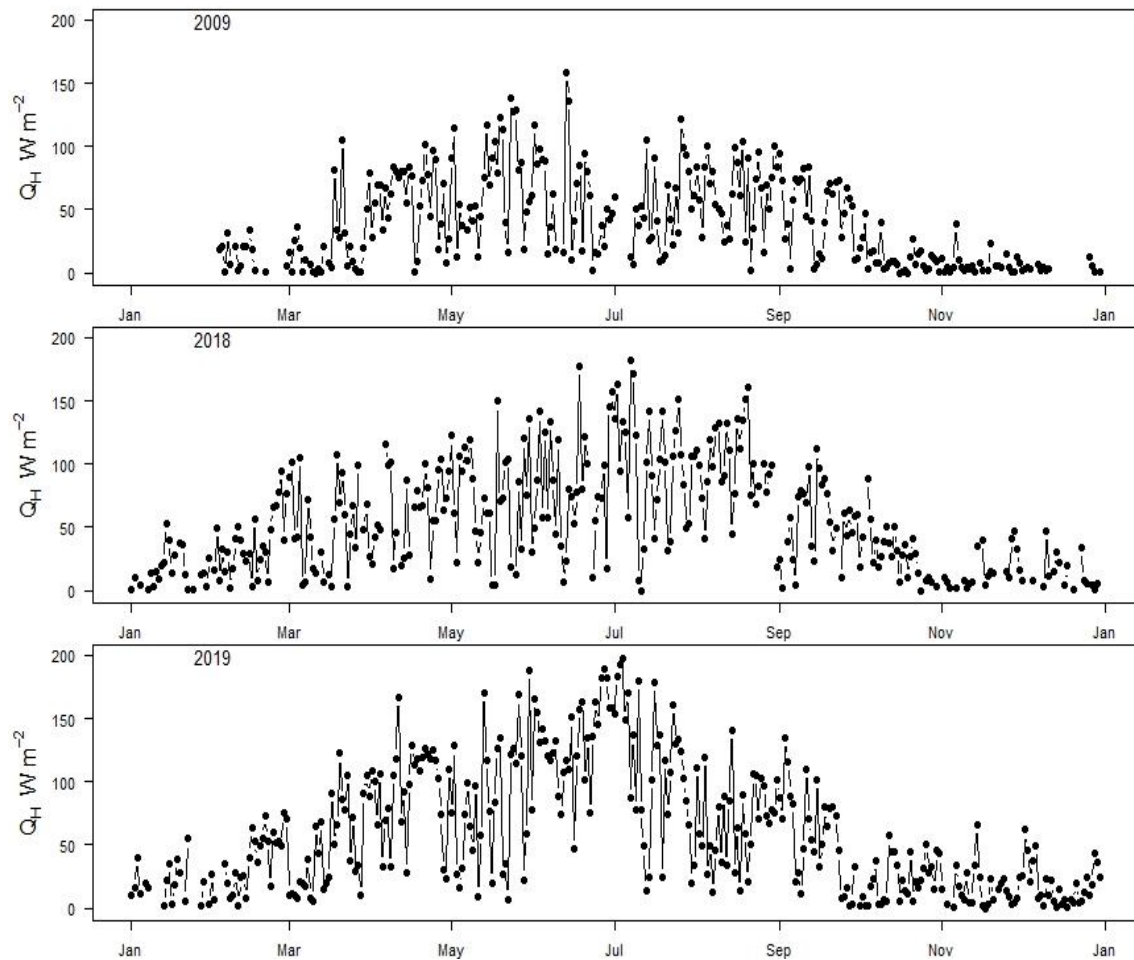


Abbildung 9: Tagesmittel des fühlbaren Wärmestroms

In Abbildung 9 sind die Tageswerte des mit der Eddy-Kovarianzmethode bestimmten und korrigierten fühlbaren Wärmestroms der Jahre 2018 und 2019 und des Referenzjahres 2009 dargestellt. Hierbei ist vor allem die Vegetationsperiode von Anfang März bis Ende November zu betrachten. Auffallend ist erstmal, dass der fühlbare Wärmestrom im Jahr 2009 generell niedriger ausfällt als in den beiden aufeinanderfolgenden Jahren. Hier zeigt sich ein stetiger Anstieg von Beginn der Wachstumsperiode bis Mitte Juni, sodass die Maximalwerte des Jahres erreicht werden. Ende Juni bis Mitte Juli zeichnet sich eine deutliche Reduzierung des fühlbaren Wärmestroms aus, während 2019 genau in diesem Zeitraum die Jahreshöchstwerte und auch die höchsten Werte der drei zu vergleichenden Jahre liegen. Im Frühjahr steigt der latente Wärmestrom in den Jahren 2018 und 2019 schon deutlich früher an als im Referenzjahr, bei dem der Anstieg erst Mitte März erfolgt.

### 3.2.3 Nettoökosystemaustausch

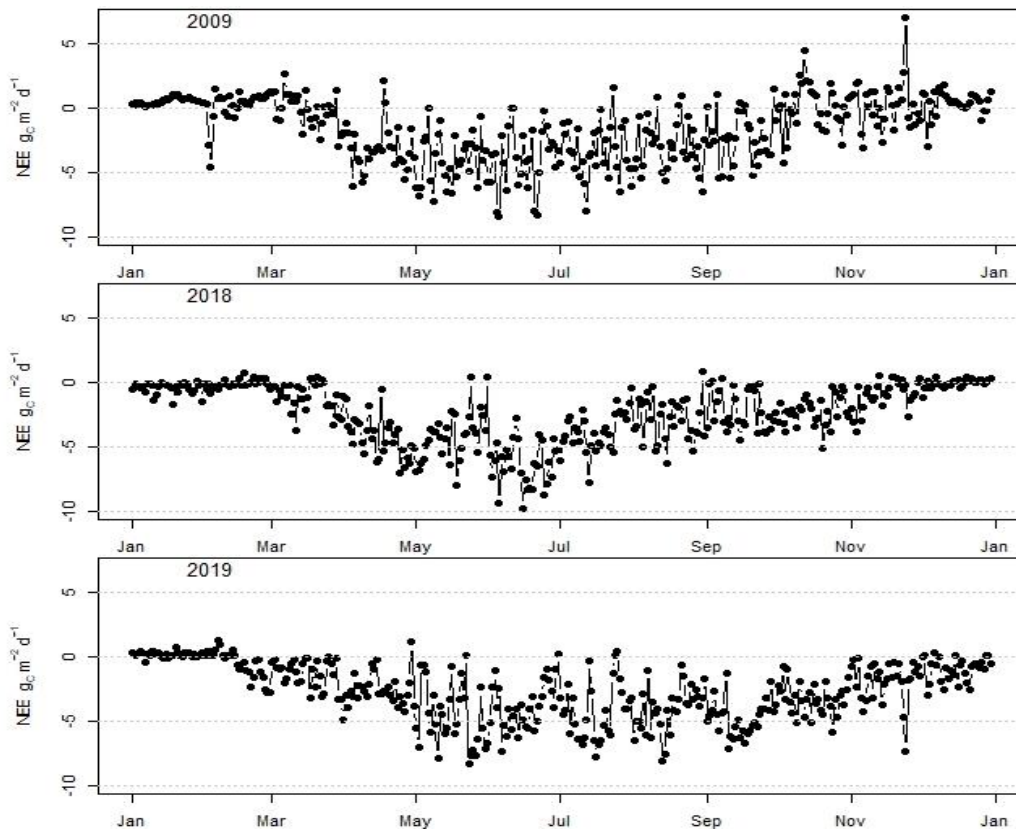


Abbildung 10: Jahresverlauf des NEE

Der NEE wird in Abbildung 10 in Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter und Tag dargestellt. Hier ist im Sommer die stärkste Kohlenstoff – Aufnahme zu sehen, welche auch mit der Wasserverfügbarkeit korreliert. Der NEE steigt 2019 deutlich früher an als in den beiden anderen Jahren. 2009 und 2018 beginnt die Aufnahme erst ab März, 2019 dagegen bereits Mitte Februar. Das Maximum wird Anfang des Sommers erreicht, wobei hier 2018 im Mai ein Einbruch zu sehen ist. Erst danach kommt es zu den höchsten Tageswerte im Juni. Darauf folgt ein deutliches Absinken der Absorption. Ab Dezember und im Januar und Februar findet generell kaum Kohlenstoff – Aufnahme statt. Hierauf beruht auch die Einteilung der Jahreszeiten, da die gewählten Abschnitte eine gewisse Gleichmäßigkeit aufweisen.

Bei einem Vergleich des Tagesverlaufs von ET und NEE anhand mittlere Tagesgänge, wurde deutlich, dass eine Änderung der Tagessumme keine erkennbaren Verschiebungen im Tagesgang hervorruft (Anhang Abbildung 16).

### 3.2.4 Brutto-Primärprodukt

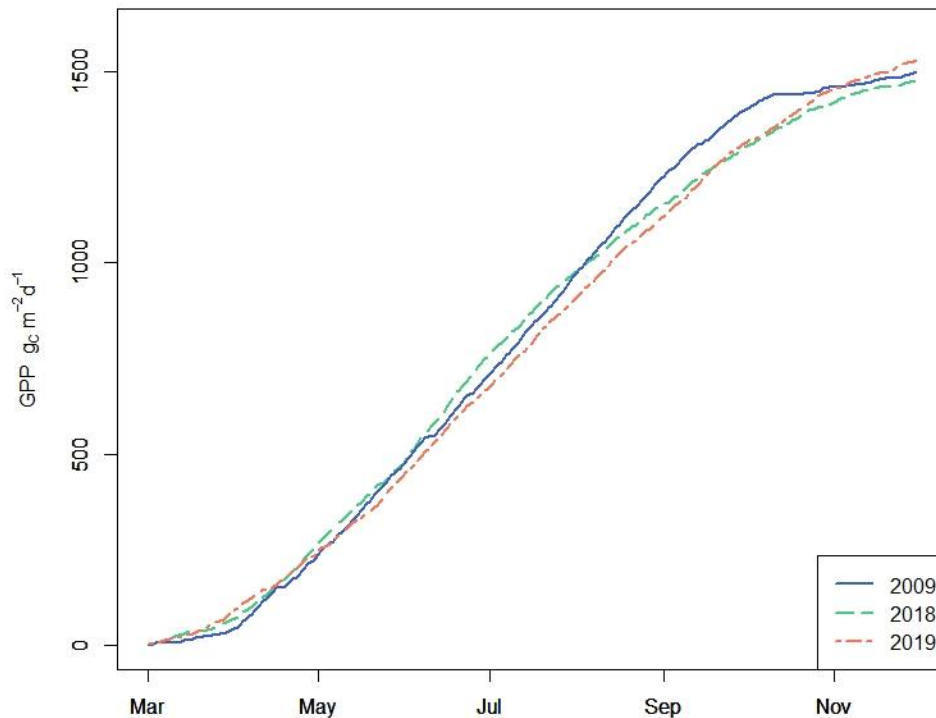


Abbildung 11: Kumulative Darstellung der GPP in Gramm Kohlenstoff in der Vegetationsperiode

Die, durch flux partitioning modellierte, Brutto-Primärproduktion (GPP) wird in Abbildung 11 als kumulativer Jahresverlauf der drei beobachteten Jahre dargestellt. Die Wintermonate wurden in dieser Darstellung ausgelassen, da das GPP in dieser Arbeit im Winter kaum von Relevanz ist. Außerdem gibt es Unterschiede in der Bearbeitungsmethode. Im Jahr 2009 stand nur der open path Sensor und das unbeheizte Metek USA zur Verfügung, was zu großen systematischen Lücken im NEE im Winter und somit zu Schwierigkeiten in der Parametrisierung des GPP in dieser Zeit geführt hat. Deshalb wurde von November bis April angenommen, dass unter einer Temperatur von  $6^{\circ}\text{C}$  keine Photosynthese stattfindet. Dadurch sind die Messwerte der drei Jahre im Winter schlechter vergleichbar. Diese Annahme gilt für 2018 und 2019 nicht. Man kann davon ausgehen, dass das GPP im März 2009 im Vergleich zu den Jahren 2018/2019 unterschätzt wird. Jedoch wird durch die niedrige Temperatur im März 2009 auch wenig Kohlenstoff aufgenommen. Ab April fällt die Temperatur im Frühjahr 2009 tagsüber nur noch an 8 Tagen deutlich unter  $6^{\circ}\text{C}$ . In den Jahren 2009 und 2018 ist der Anstieg des GPP vergleichbar und steigt mit ähnlichem Zuwachs an. Hier ist allerdings zu beachten, dass das GPP von 2019 durch die Modellierung etwas überschätzt wird. Ab Juli ist die Produktivität im Jahr 2018 sichtbar geringer als 2009 und auch als 2019. Zu Beginn der betrachteten Zeitspanne liegt 2019 der Zuwachs an GPP deutlich unterhalb der anderen beiden Jahre. Hier sieht man schon im Frühling eine geringere Produktivität der Vegetation. Von Juni bis Mitte Juli ist die Steigung jedoch ähnlich zur derselben im Jahr 2009 und größer als 2018. Ende September übersteigt die Summe des GPP

von 2019 sogar die von 2018 und steigt auch bis Ende der Vegetationsperiode im November stärker als diese an.

### 3.3 Indizes für Trockenstress

#### 3.3.1 Bowen-Verhältnis

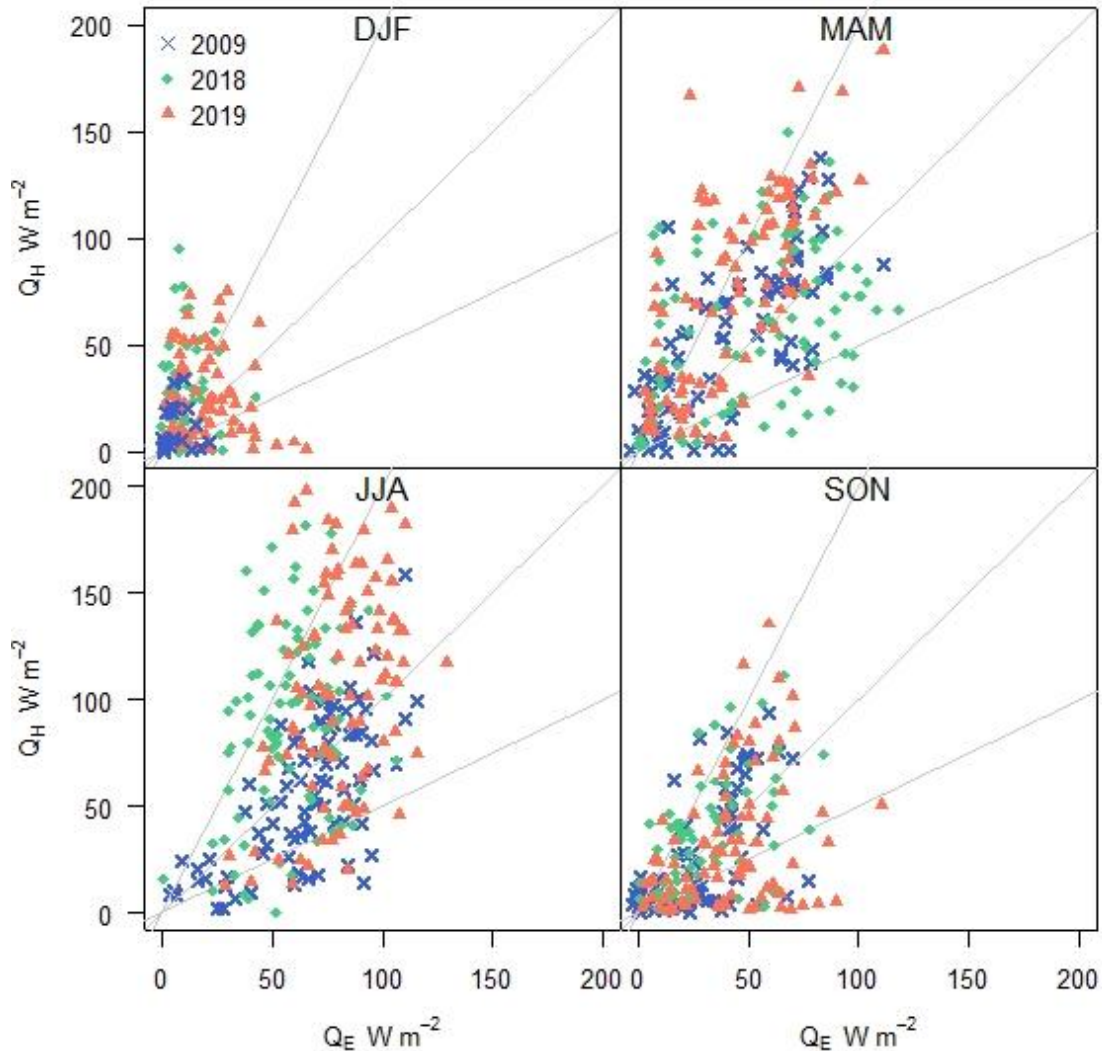


Abbildung 12: Jahreszeitliche Darstellung des Bowen-Verhältnisses als  $Q_E$  gegen  $Q_H$ , die durchgezogenen Linien stellen Bowen-Verhältnisse von 0,5, 1 und 2 dar.

Das Bowen-Verhältnis ( $\beta$ ) wird in Abbildung 12 dargestellt als das Verhältnis des fühlbaren zu latenten Wärmestroms, aufgeteilt in die jeweiligen Jahreszeiten um die saisonalen Unterschiede zu sehen. Hier ist im Frühling zu sehen, dass 2018 das Bowen-Verhältnis deutlich geringere Werte und eine größere Streuung aufweist als beide andere Jahre. Im Sommer ist bei den Jahren 2018 und 2019 der fühlbare Wärmestrom deutlich höher, bei einem ähnlichen latenten Wärmestrom wie in 2009. Hier ist eine regulatorische Aktivität der Fichte über die Stomata zu sehen. Außerdem die Streuung im Herbst sehr hoch und es kommen auch vermehrt sehr niedrige Bowen-Verhältnisse, mit  $Q_H$  annähernd 0, vor.



### 3.3.2 Dürreindex

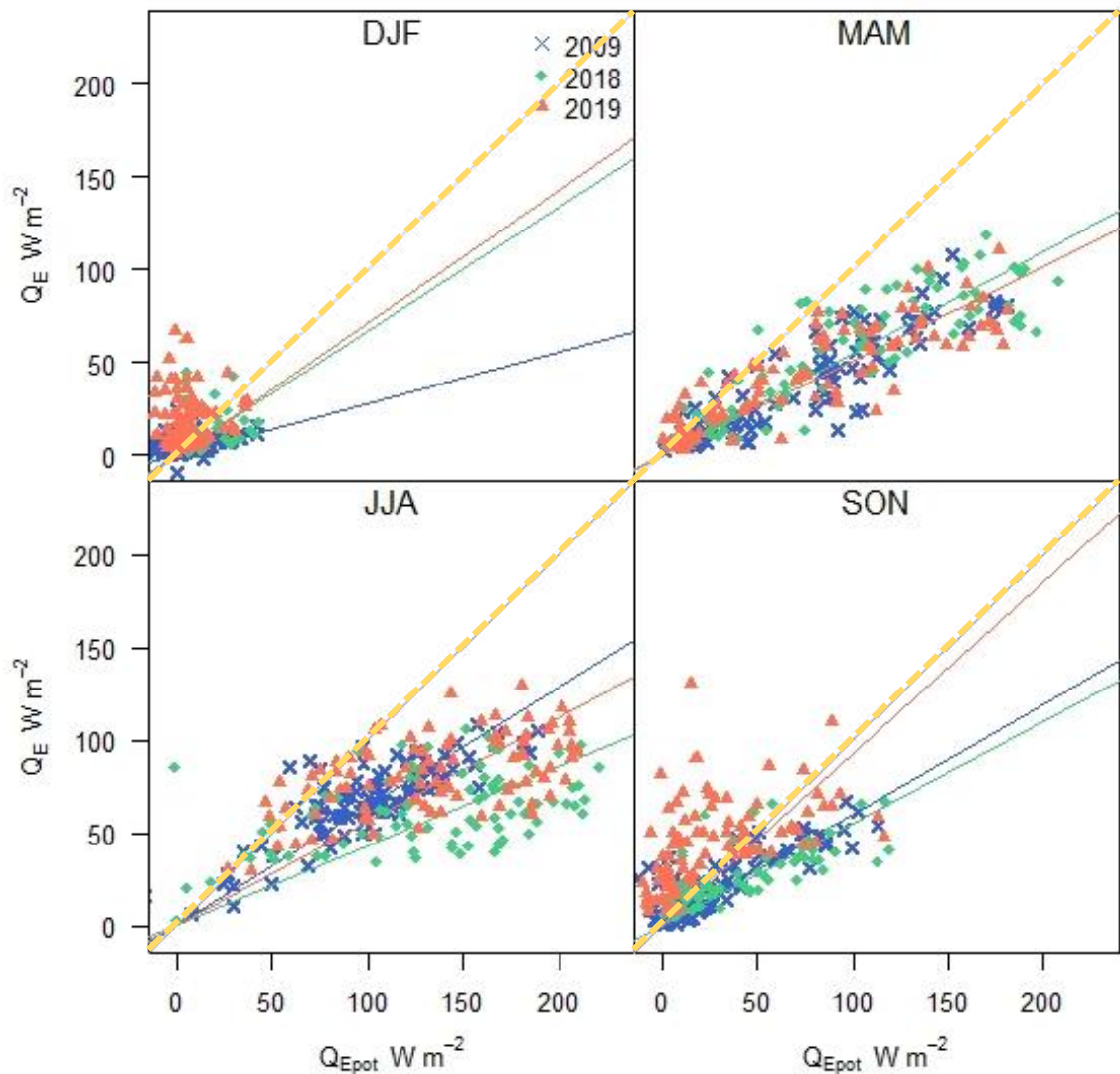


Abbildung 13: Dürreindex dargestellt als  $Q_E$  zu  $Q_{Epot}$  mit den jeweils farbigen Regressionsgeraden, außerdem ist in Gelb hervorgehoben die Gerade des  $DI = 1$

In Abbildung 13 ist der Dürreindex der jeweiligen Jahreszeiten für die drei beobachteten Jahre dargestellt als  $Q_E$  gegen  $Q_{Epot}$ . Es ist deutlich zu sehen, dass im Frühling sowohl die Datenpunkte jedes einzelnen Jahres nur wenig gestreut sind als auch die Regressionsgeraden der drei Jahre sehr nah zusammenliegen. Das zeigt, dass das System in dieser Jahreszeit energielimitiert ist. Im Sommer ändert sich dieses Bild. Die Werte sind unregelmäßiger und gestreuter. Die  $Q_{Epot}$  ist vor allem im Jahr 201 im Vergleich zur  $Q_E$  deutlich höher. 2019 liegen sowohl  $Q_E$ , als auch  $Q_{Epot}$  über denen von 2009. Herbst liegen 2018 und 2009 wieder recht nah beieinander. Die hohe Streuung der Datenpunkte im Sommer und Herbst kommt daher, dass das System wasserlimitiert ist. So kommt es zu niedrigen Verdunstungs – Werten, sobald es aber doch Niederschlag gibt, steigt die Verdunstung. Auffallend im Herbst 2019 sind die hohen Verdunstungen, wobei es dazu kommt, dass  $Q_E > Q_{Epot}$  ist. Damit ist das Energielimit überschritten. Dieser Zustand kann nur kurzfristig vorkommen, tritt aber in diesem Fall häufiger auf.

### 3.4 Auswirkung auf Kohlenstoff, Wassernutzungseffizienz

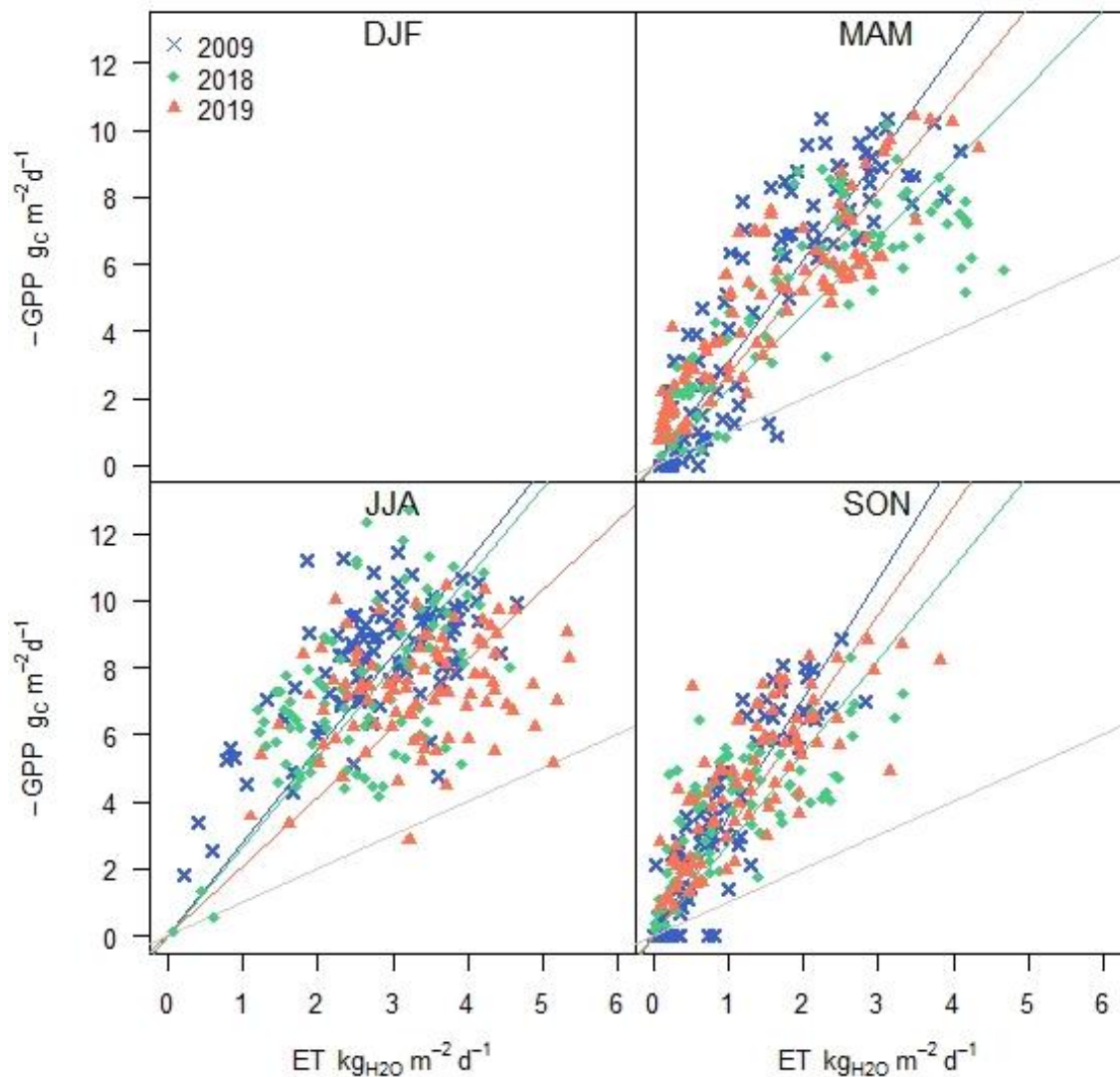


Abbildung 14: WUE dargestellt als -GPP zu ET mit den jeweils farbigen Regressionsgeraden und eine Gerade der Steigung 1

Bei der Darstellung der Wassernutzungseffizienz WUE als negative GPP gegen ET aufgeteilt in Jahreszeiten erkennt man, dass in den Wintermonaten wie zu erwarten sowohl GPP als auch ET bei den drei Jahren ähnlich niedrig sind. Da in dieser Jahreszeit die Aktivität der Vegetation so gering ist wird im Folgenden auf diese Zeit nicht weiter eingegangen. Im Frühling kann man die Tendenz erkennen, dass die WUE im Jahr 2009 bereits leicht höher ist als die der anderen beiden Jahren und, dass die Datenpunkte weniger gestreut liegen als sie es in den Sommermonaten sind. 2018 weist hierbei die höchsten Verdunstungswerte auf. Es ist auch erkennbar, dass die WUE im Sommer von 2018 in Wertebereichen liegt, wie sie auch in 2009 liegen. Hier ist 2018 im Vergleich zu 2009 weder ein Rückgang der Verdunstung noch der Kohlenstoffaufnahme zu sehen, trotz der Trockenheit im Frühling. Im Jahr 2019 ist im Sommer die Verdunstung verglichen mit 2009 und 2018 sehr hoch. Hier ist eine deutliche Steigerung der ET im Vergleich zum Frühling erkennbar. Während die Kohlenstoffaufnahme im selben Bereich liegt wie in den

beiden anderen Jahren. Die Werte im Herbst sehen bei allen drei Jahren wieder ähnlich aus. Es wurde auch die intrinsische WUE („inherent WUE“ on ecosystem scale) nach der Definition von (Beer et al. 2009) von den Jahren 2018 und 2019 berechnet (Anhang Abbildung 17). Mit der Erwartung, dass der Lineare Zusammenhang der GPP und ET mit Einbeziehung des Wasserdruckdefizites (VPD) besser dargestellt werden kann. Dies führte aber zu einer größeren Streuung und nicht zu dem erwarteten Effekt.

## 4 Diskussion

### 4.1 Einordnung der untersuchten Jahre in die Klimahülle der Fichte

Ziel dieser Arbeit war es die Intensität der Auswirkungen der Trockenheit auf den Fichtenwald am Waldstein anhand der Kohlenstoffflüsse und des Wasseraustausches zwischen der Vegetation und der Atmosphäre herauszufinden. Dass in den Jahren 2018 und 2019 eine ausgeprägte Trockenheit herrschte, wurde anhand der klimatischen Messungen von Temperatur und Niederschlag deutlich gezeigt. Der am Messturm gemessene Niederschlag lag 2009 bei 987 mm, 2019 bei 831 mm und bei dem trockensten Jahr 2018 bei nur 643 mm. Die

mittleren Temperatur des gesamten Jahres ist 2009 6,8°C, 2018 8,0°C und 2019 7,8°C. Diese Kombination aus geringem Niederschlag und hohen Temperaturen haben Auswirkungen auf die Vegetation. Bei der Einordnung dieser Werte in die Klimahülle der Fichte in Deutschland (Kölling 2007) sieht man bei den Tendenzen eines immer trockeneren und wärmeren Jahres sieht man, dass man sich immer weiter an den Rand der Klimatischen Verhältnisse bewegt, in denen für die Fichte optimale Bedingungen herrschen. Allerdings ist die Einordnung auf diese Weise sehr

ungenau, da nicht beachtet werden kann, wann der Niederschlag fällt und ob es in der wichtigen Wachstumsphase im Frühjahr zu Wassermangel kommt. Auch die Verhältnisse des Vorjahres und mögliche Beeinflussungen daraus werden nicht dargestellt. Ein weiteres Problem bei dieser Darstellung ist, dass die jährliche Niederschlagsmenge wenig über die Wasserverfügbarkeit aussagt, da die Standorte sehr unterschiedlich sein können. Der untersuchte

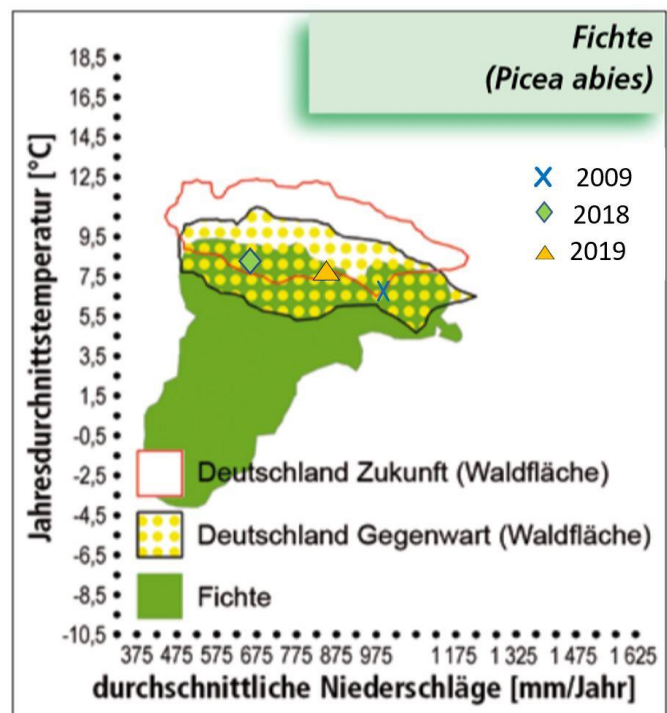


Abbildung 15: Klimahülle der Fichte in Deutschland (Kölling 2007)

Mittelgebirgsstandort auf klüftigem Granit kann beispielsweise schnell drainieren. Anders als ein Standort mit einem Boden, der eine hohe Wasseraufnahmekapazität hat.

## 4.2 Auswirkungen der Trockenheit auf Kohlenstoff- und Wasseraustausch

### 4.2.1 Frühjahrstrockenheit im Jahr 2018

Der Beginn des Jahres 2018 war sehr trocken. So gab es beispielsweise im gesamten Februar nur 11,6 mm Niederschlag und insgesamt im Frühling 147,7 mm. Im Gegensatz dazu fiel im Frühling 2019 und 2009 mit 241,2 mm und 261,9 mm ähnlich viel Niederschlag. Dazu kommt, dass 2018 ab Ende April die Durchschnittstemperaturen relativ hoch waren. Daher kommt eine hohe Verdunstung, wodurch das Bowen-Verhältnis 2018 hier geringer ist. Es scheint hier aber noch keine Wasserlimitation zu geben, da sonst die Verdunstung durch die Schließung der Stomata reguliert werden würde. Bei der Betrachtung der WUE sieht man, dass die GPP niedriger ist, bei einer höherer Verdunstung. Die WUE ist also geringer, vor allem als im Jahr 2009, in dem die WUE am höchsten ist.

### 4.2.2 Dürresommer

Im Sommer ist der Dürreindex 2018 deutlich niedriger und das Bowen-Verhältnis höher als in den anderen beiden Jahren. Es verdunstet deutlich weniger Wasser, als es bei diesen Bedingungen möglich wäre. Das und die größere Streuung der Datenpunkte spricht für eine Wasserlimitation. Anfangs ist auch die GPP hoch, bis es Ende Juli zu einem Einbruch der GPP kommt, da die Pflanzen durch die Wasserlimitation weniger produktiv Kohlenstoff aufnehmen und zu Biomasse umwandeln können.

Die mittlere WUE des Sommers 2018 ist ähnlich zu dem von 2009. Man sieht 2018 in Abbildung 14 eine Häufung an Datenpunkten bei einer leicht geringeren GPP.

Der Sommer 2019 weist gemäßigte Anzeichen für Trockenstress aus als 2018, obwohl es das zweite trockene Jahr in Folge ist. Beim DI sieht man auch eine größere Streuung der Datenpunkte als 2009, er ist aber insgesamt höher als 2018. Die Streuung hängt wahrscheinlich mit der langen Trockenperiode zusammen. Ab Ende Mai treten nur noch sporadisch sehr geringe Niederschläge auf. Ende Juni und Anfang Juli fällt einige Zeit gar kein Niederschlag.

Das Bowen-Verhältnis ist etwas geringer als 2018, trotzdem höher als 2009. Es gibt in den Sommermonaten auch keinen so starken Einbruch der GPP wie in 2018. Diese bleibt in den Sommermonaten relativ konstant. Hierbei muss allerdings die systematische Überschätzung der GPP durch die Modellierung bedacht werden. Die WUE sinkt verglichen zu den Frühlingsmonaten und ist deutlich niedriger im Sommer 2018 und auch 2009.

Mit dem Ende des Sommers, bindet die Vegetation weniger Kohlenstoff. In dem trockensten Jahr 2018 sinkt die Kohlenstoffaufnahme ab Ende Juni stark. Bei der GPP sieht man im August

nochmal einen deutlichen Einbruch. Dagegen hält die Aufnahme in 2009 bis August an und die GPP bleibt relativ konstant bis Oktober. Dann kommt es zu niedrigen Temperaturen, bei denen die Tagesmittel schon unter Null Grad fallen. Im Herbst fällt das Bowen-Verhältnis, verglichen mit dem Sommer, in den Jahren 2018 und 2019 deutlich niedriger aus. Das zeigt, dass wenig verfügbare Energie vorhanden ist, da diese Energie geht bei der Verdunstung in die latente Wärme. In 2019 schwankt der Verlauf des NEE ab Juni deutlich mit den Niederschlagsereignissen. Es kommt Anfang September zu einem starken Niederschlagsereignis. Somit ist wieder Wasser für die Transpiration zur Verfügung, die Kohlenstoffaufnahme steigt erneut. Der NEE erreicht einen kurzzeitigen Peak und auch die Verdunstung ist plötzlich sehr hoch. Durch die hohe Verdunstung ist der fühlbare Wärmestrom an einigen Messtagen nahe null. Auffallend ist, dass der DI 2019 deutlich höher ist und die tatsächliche Verdunstung höher als die potentielle Verdunstung ist.

#### 4.2.3 Carry-Over-Effekt im Frühling 2019

Entgegen der Erwartung, dass 2019 bereits im Frühling ein sogenannter „Carry-Over-Effekt“, also Auswirkungen der Trockenheit aus dem Vorjahr, eintrifft und der Bestand schon bei Beginn der Vegetationsperiode an einer Wasserlimitation leidet, scheint die Wasserverfügbarkeit auszureichen um erstmal die Produktivität aufrecht zu erhalten. Der DI ist auch sehr ähnlich zu dem von dem Jahr 2009, in dem es nicht zu einer ausgeprägten Trockenheit kam. Allerdings zeigt das Bowen-Verhältnis, dass der fühlbare Wärmestrom an manchen Tagen sehr hoch ist, bei einem nicht allzu hohen latenten Wärmestrom. An diesen Tagen steht wenig Energie für die Verdunstung zur Verfügung und damit auch für die GPP. Da die Niederschlagsmengen zwar gering, aber bis auf eine längere Trockenperiode recht gleichverteilt sind, gab es wahrscheinlich häufig Bewölkung. Während im Sommer diffuses Licht häufig positiv für die Photosynthese gesehen wird, ist es im Frühjahr schlichtweg zu wenig.

Bei der kumulativen Darstellung in Abbildung 11 sieht man Mitte April einen leichten Einbruch der GPP. Die leicht geringere WUE in 2019 als 2009 könnte als Carry-Over-Effekt gewertet werden, da dem System weniger Wasser aus dem Vorjahr zur Verfügung steht. Die Trockenperiode, die zu dieser Zeit stattfindet kann nicht mit Wasserressourcen aus dem Vorjahr aufgefangen werden.

Auch sieht man, dass es eine Häufung von Datenpunkten von 2019 bei GPP Werten von  $4-7 \text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$  gibt. Die Datenpunkte sind 2009 gleichmäßiger verteilt und in 2018 bei Werten von ca.  $6-9 \text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$  gehäuft. Ebenso die niedrigere GPP deutet auf eine Schließung der Stomata und damit eine Schutzreaktion der Bäume aufgrund von Trockenheit hin.

Ob es 2018 zu irreversiblen Schäden kam, ist hier nicht zu entscheiden. Dazu wären die Analysen weiterer Jahre, vor allem des Jahres 2020 notwendig. Interessant zu betrachten wäre hier die Veränderung der Dauer der Trockenperiode, bis es zu einem Einbruch der Produktivität kommt.

### 4.3 Fehlerdiskussion

Trotz einer hohen Zuverlässigkeit von Messgeräten treten bei der quantitativen Bestimmung von physikalischen Größen unvermeidbare Messfehler auf. Es wurden physikalisch unplausible Werte, die ausgeschlossen wurden und fehlende Werte der Jahre 2018 und 2019 mithilfe einer Gapfilling Routine in Matlab berechnet und aufgefüllt. Auch bei einer sorgfältigen Auswahl der Eingangsdaten weichen berechnete Werte von den realen Gegebenheiten ab.

Bei der Modellierung der GPP von 2019 wurde teilweise negative Werte ausgegeben, welche dann händisch ausgeschlossen wurden. Dadurch kommt es zu einer leichten Überschätzung der GPP im Jahr 2019.

Außerdem wurde für die Daten von 2009 mit anderen Korrekturmethode und Lückenfüllmethoden gerechnet, was die Vergleichbarkeit der Datensätze aus den unterschiedlichen Jahren beeinflusst.

Es wurde auch im Rahmen dieser Arbeit die Annahme gemacht, dass die gemessene Evapotranspiration an Tagen ohne Niederschlag gleichzusetzen ist mit der Transpiration. Daraufhin wurden, wenn es notwendig war, die Daten ausgeschlossen. Hier wurden je nach Gebrauch der Daten entweder die Halbstundenwerte mit Niederschlag plus zwei Stunden danach oder ganze Tage mit Niederschlag herausgefiltert. Dabei kann es zu Ungenauigkeiten und zu einer geringeren Datendichte gekommen sein, wenn es beispielsweise bis kurz vor Mitternacht geregnet hat und der Niederschlag noch Auswirkungen hat und die Blattoberflächen bis in den nächsten Tag nass sind. Tage, an denen der Niederschlag unter 0,1 mm gefallen ist, wurden nicht entfernt.

## 5 Schlussfolgerung

Insgesamt sind die Auswirkungen der Dürrejahre schwächer ausgeprägt als erwartet und die Bäume scheinen sich gut davon erholen zu können. Selbst im Jahr 2019, welches das zweite Dürrejahr in Folge ist, kehrt die Produktivität nach einem stärkeren Niederschlagsereignis wieder zu regulären Werten zurück. Langfristige Schäden können diesbezüglich nicht erfasst werden.

Auch wenn der Carry-Over-Effekt hier weniger deutlich erkennbar war als vermutet, werden bei weiteren trockenen und sehr warmen Jahren wird sich das vermutlich verstärken und die irreversiblen Schäden zunehmen. Im Jahr 2020 wurde die Trockenheit und die hohen Temperaturen in Deutschland weitergeführt. Laut dem (Friedrich et al. 2021) war das Jahr 2020 mit einer Mitteltemperatur von 10,4 °C nur geringfügig kühler als das bisherige Rekordjahr 2018. Mit einem Niederschlag von 705 mm war 2020 auch trockener als 2019 (Friedrich et al. 2021). Ohne Erholungsjahre, in denen Wasserreservoir aufgefüllt werden können und die Vegetation Trockenschäden zumindest teilweise reparieren kann wird die Toleranz gegenüber der Wasserlimitation immer niedriger. Hier könnte in weiteren Untersuchungen auch das Jahr 2020 und Folgende mit einfließen. Interessant wären auch Unterschiede der Auswirkungen auf Bestände unterschiedlichen Alters. Sehr junge Individuen haben eine geringere Wurzeltiefe und -dichte, wodurch die Feuchtigkeit im Boden nur bis in eine geringere Tiefe aufgenommen werden kann. Ältere Bäume dagegen werden durch Alterserscheinungen wieder anfälliger für Störungen. Dies kann forstwirtschaftlich von großem Interesse sein, wenn zukünftige Bestände geplant werden. Um eine generellere Aussage treffen zu können müssten auch die Bedingungen unterschiedlicher Standorte gemessen werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind nur für diesen bestimmten Standort aussagekräftig.

Um einen Einblick in eine mögliche Zukunft zu bekommen, könnte man sich existierende Standorte anschauen, in denen das Klima heute so ist, wie es in Deutschland voraussichtlich in den nächsten 50-100 Jahren sein wird. Wenn es in diesen Gebieten Fichtenbestände gibt, könnten anhand deren Zustand und Verhalten Rückschlüsse auf die Zukunft der Fichte in Deutschland gezogen werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- Aubinet, Marc; Vesala, Timo; Papale, Dario (2012): Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. 1. Aufl. s.l.: Springer Netherlands (Springer atmospheric sciences).
- Beer, C.; Ciais, P.; Reichstein, M.; Baldocchi, D.; Law, B. E.; Papale, D. et al. (2009): Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. *Global Biogeochemical Cycles* 23 (2), 1-13. DOI: 10.1029/2008GB003233.
- Choat, Brendan; Jansen, Steven; Brodribb, Tim J.; Cochard, Hervé; Delzon, Sylvain; Bhaskar, Radika et al. (2012): Global convergence in the vulnerability of forests to drought. In: *Nature* 491 (7426), S. 752–755. DOI: 10.1038/nature11688.
- Ciais, Ph; Reichstein, M.; Viovy, N.; Granier, A.; Ogee, J.; Allard, V. et al. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. In: *Nature* 437 (7058), S. 529–533. DOI: 10.1038/nature03972.
- Friedrich, Karsten; Imbery, Florian; Breier, Juliane (2019): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2018. DWD Geschäftsbereich Klima und Umwelt. Hg. v. Deutscher Wetterdienst Bildungszentrum (Selbstverlag). Deutscher Wetterdienst. 63067 Offenbach, zuletzt geprüft am 05.06.2021.
- Friedrich, Karsten; Imbery, Florian; Breier, Juliane (2020): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2019. DWD Geschäftsbereich Klima und Umw. Hg. v. Deutscher Wetterdienst Bildungszentrum (Selbstverlag). Deutscher Wetterdienst. 63067 Offenbach, zuletzt geprüft am 05.06.2021.
- Friedrich, Karsten; Imbery, Florian; Breier, Juliane (2021): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. DWD Geschäftsbereich Klima und Umwelt. Hg. v. Deutscher Wetterdienst Bildungszentrum (Selbstverlag). Deutscher Wetterdienst. 63067 Offenbach. Online verfügbar unter [www.dwd.de/DE/derdwd/bibliothek/fachpublikationen/selbstverlag/selbstverlag\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/derdwd/bibliothek/fachpublikationen/selbstverlag/selbstverlag_node.html), <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/klimastatusbericht.htm>, zuletzt aktualisiert am 2021, zuletzt geprüft am 07.06.2020.
- Heinzelmann, Valentin (2019): Carbon and energy exchange at a submontane grassland site in an extremely dry year. Master thesis in geocology. Universität Bayreuth.
- Hetsch, W.; Heilig, K.-H. (1981): Der Wasserhaushalt von Fichte in Abhängigkeit von Boden und Atmosphäre. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (144), S. 317–330.
- Klosterhalfen, Anne; Graf, Alexander; Brüggemann, Nicolas; Drüe, Clemens; Esser, Odilia; González-Dugo, María P. et al. (2019): Source partitioning of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes based on high-frequency eddy covariance data: a comparison between study sites. In: *Biogeosciences* 16 (6), S. 1111–1132. DOI: 10.5194/bg-16-1111-2019.
- Kölling, Christian (2007): Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. Hg. v. LWF Bayern. Freising (Der Wald). Online verfügbar unter <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/afz-klimahuellen-fuer-27-baumarten.pdf>, zuletzt geprüft am 23.04.2021.
- Müller-Kroehling, S.; Walentowski, H.; Bußler, H.; Kölling, C. (2009): Natürliche Fichtenwälder im Klimawandel – Hochgradig gefährdete Ökosysteme. In: *LWF Wissen* (63), S. 70–85.
- Priestley CHB; Taylor RJ (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* (100), S. 137–166. DOI: 10.1175/1520-0493(1972).
- RCore Team (2019): RStudio. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Version R version 3.6.2. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.



Rebmann, Corinna (2003): Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Energieaustausch eines Fichtenwaldes in Mittelgebirgslage in Nordostbayern. Dissertation aus der Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth. Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (106).

Ruppert, J.; Mauder, M.; Thomas, C.; Lüers, J. (2006): Innovative gap-filling strategy for annual sums of CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange, *Agricultural and Forest Meteorology*, S. 5–18.

Teuling, Adriaan J.; Seneviratne, Sonia I.; Stöckli, Reto; Reichstein, Markus; Moors, Eddy; Ciais, Philippe et al. (2010): Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. In: *Nature Geosci* 3 (10), S. 722–727. DOI: 10.1038/ngeo950.

Teuling, Adriaan J.; Uijlenhoet, Remko; Hupet, François; Troch, Peter A. (2006): Impact of plant water uptake strategy on soil moisture and evapotranspiration dynamics during drydown. In: *Geophys. Res. Lett.* 33 (3). DOI: 10.1029/2005GL025019.

Thomas, C. K.; B. E. Law; J. Irvine; J. G. Martin; J. C. Pettijohn; and K. J. Davis (2009): Seasonal hydrology explains interannual and seasonal variation in carbon and water exchange in a semiarid mature ponderosa pine forest in central Oregon. *J. Geophys. Res.* (114). DOI: 10.1029/2009JG001010.

Zhang, L.; Dawes, W. R.; Walker, G. R. (2001): *Water Resources Research*. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale, S. 1–2. Online verfügbar unter <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2000WR900325>.

## Bildquellen

Abbildung 3 und Abbildung 2: *Konzeptmodelle für die Verdunstung  $\lambda ET$  und die fühlbare Wärme  $H$  über Grünland und Wald während Trockenheit*

Teuling, Adriaan J.; Seneviratne, Sonia I.; Stöckli, Reto; Reichstein, Markus; Moors, Eddy; Ciais, Philippe et al. (2010): Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. In: *Nature Geosci* 3 (10), S. 725. DOI: 10.1038/ngeo950

Abbildung 4: *„Turbulence Tower“ (TT) am Waldstein*

Thomas Foken, Pedro Gerstenberger, Katharina Köck, Lukas Siebke, Andrei Serafimovich und Johannes Lüers (2017): *Energy and matter fluxes of a spruce forest ecosystem*. Cham: Springer (Ecological studies, vol. 229), S. 532, DOI: 10.1007/978-3-319-49389-3\_2

Abbildung 25: *Standort des Messturms am Waldstein*

<https://www.google.de/maps/place/50%C2%B008'31.0%22N+11%C2%B052'01.0%22E/@50.1397475,11.8656784,1366m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d50.1419444!4d11.8669444>

# Anhang

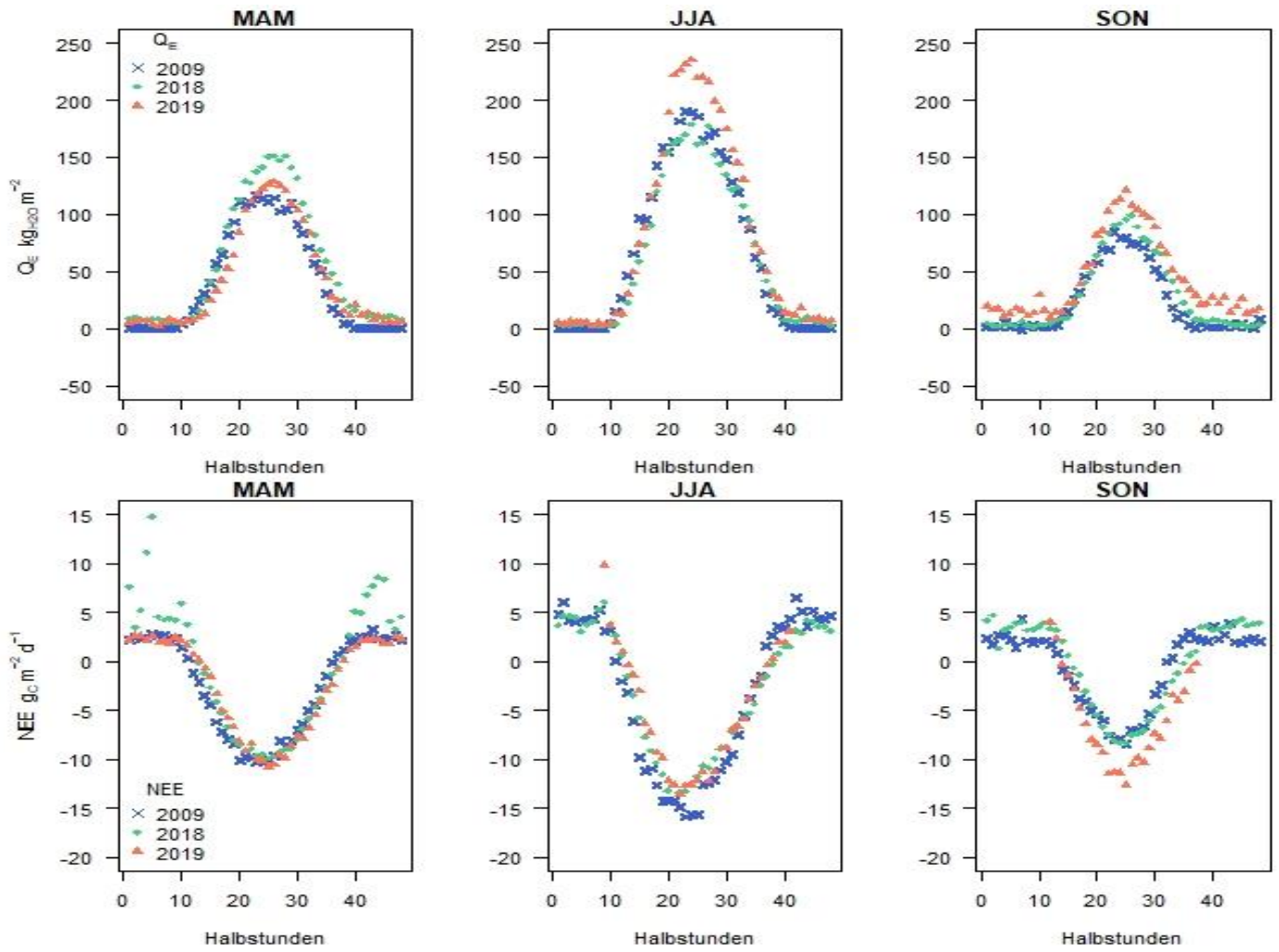


Abbildung 16: Mittlere Tagesgänge von  $Q_E$  und  $NEE$

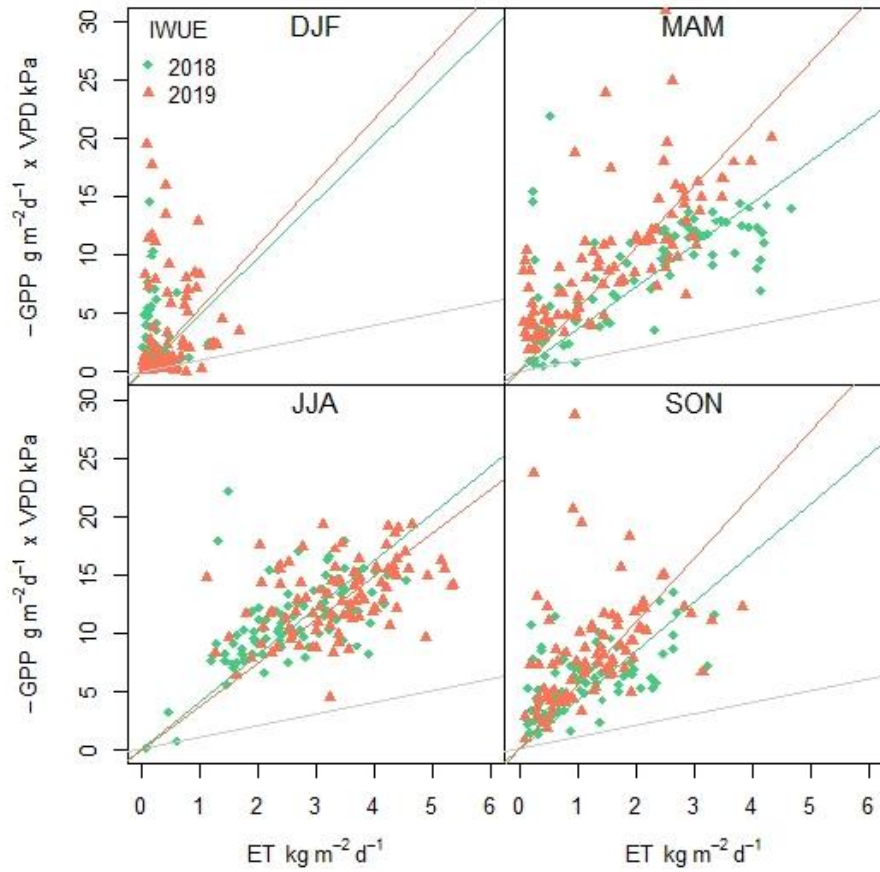


Abbildung 17: Intrinsische WUE

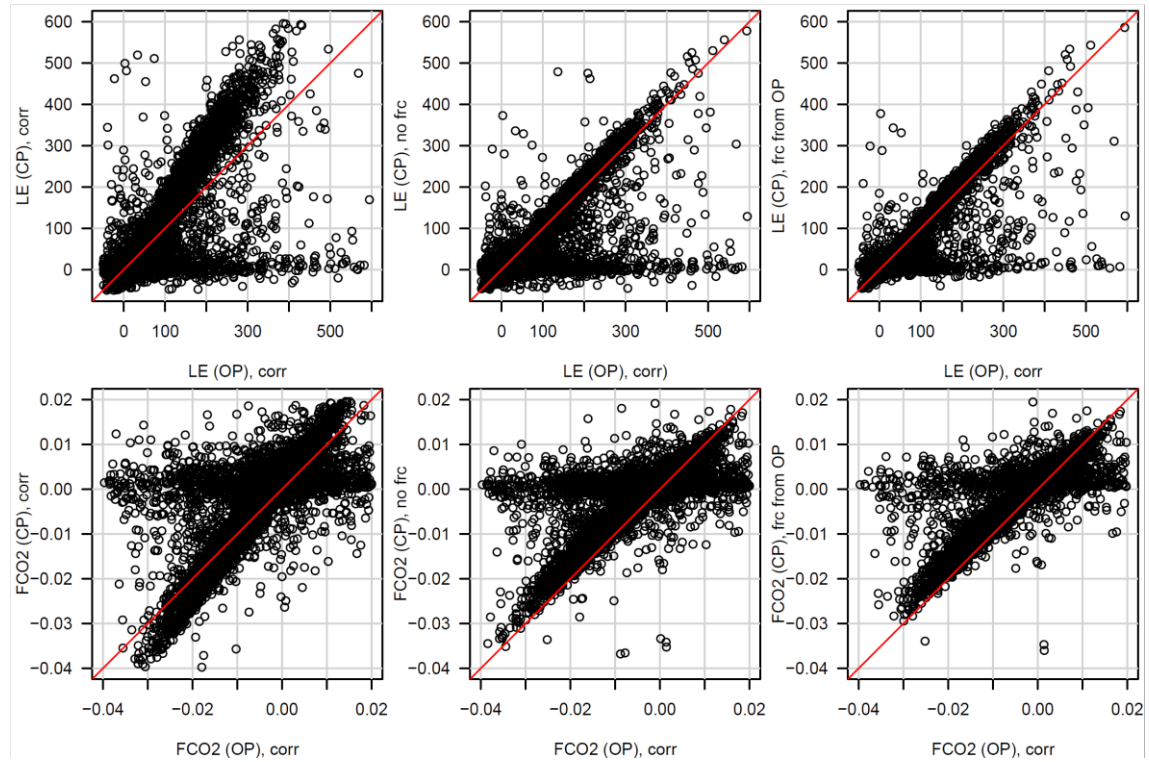


Abbildung 18: QAQC open path und closed path