



**UNIVERSITÄT  
BAYREUTH**

Abteilung Mikrometeorologie

Bachelorarbeit in der Geoökologie

# **Veränderung der Frostdynamik an der Wetterstation des Ökologisch Botanischen Garten der Universität Bayreuth**

von  
Nicolas Wagner

Bayreuth, im März 2016

Betreuer: Dr. Wolfgang Babel  
Zweit-Gutachter: Prof. Dr. Christoph Thomas



# Zusammenfassung

Aufgrund verschiedener anthropogener Ursachen steigt die Temperatur momentan weltweit an. Auch regional werden bereits Steigerungen der Temperatur festgestellt. Dies führt zu Veränderungen in der Frostdynamik. Um Schäden für die Pflanzen zu vermeiden, müssen diese Veränderungen genau untersucht werden. Die Daten für die Analyse werden seit 1997 direkt an der Messstation im ökologisch-botanischen Garten mittels Psychrometer und HMP 45 gemessen und in einer Online-Datenbank archiviert. Besonders wichtig für die Untersuchung der Frostdynamik sind hierbei die Temperaturreihen in 2m und 5cm Höhe. Diese Temperaturdaten werden mit der Computer-Software "R" analysiert und ausgewertet. Insgesamt spiegelt sich die globale Erwärmung auch in den Ergebnissen wider. Der Temperaturverlauf der beiden Temperaturreihen über das Jahr ähnelt sich sehr. Bei der längsten anhaltenden Frostperiode sind allerdings große Unterschiede bei beiden Temperaturreihen festzustellen; einen sichtbaren Trend jedoch gibt es nicht. Der kälteste Tag im Jahr sowie die Temperatur dieses Tages scheint sich ebenfalls nicht großartig zu verändern. Die Untersuchung der durchschnittlichen Frosttemperatur zeigt eine recht deutliche Steigerung für die Temperatur in 5cm Höhe an. Keinen signifikanten Trend hierfür gibt es bei der Temperatur in 2m Höhe zu beobachten. Über den Verlauf von Frostereignissen sowie die Anzahl der Periodenwechsel zwischen Frostperiode und Nichtfrostperiode kann ebenfalls keine sichere Aussage getroffen werden. Besonders bei der Untersuchung des ersten und letzten Frosttages können erneut deutliche Unterschiede bei den beiden Temperaturreihen festgestellt werden. Vor allem die Temperatur in 5cm Höhe scheint sich im Verlauf der Jahre zu späteren ersten Frosttagen und früheren letzten Frosttagen zu verschieben. Dies wird mit der Untersuchung der frostfreien Periode bestätigt, in welcher die Dauer der frostfreien Periode für die Temperatur in 5cm Höhe signifikant ansteigt. Dieser Anstieg spiegelt sich jedoch nicht in der Temperatur in 2m Höhe wider. Da wegen der geringen Datenmenge vieles nicht mit Sicherheit bestätigt werden kann, empfiehlt es sich, die Untersuchungen in Zukunft fortzusetzen. Etwaige Maßnahmen zum Schutz der Pflanzen sollten allerdings schon getroffen werden, da eine weitere Erhöhung der Temperatur und Veränderung der Frostdynamik sehr wahrscheinlich ist.

# Abstract

The global temperature currently is rising due to several different anthropogenic sources. A local increase of the temperature has also been detected. This leads to changes in the dynamics of the frost. Thus, these changes have to be researched further to avoid that the plants get damaged. Since 1997 the data for the analysis is measured directly at the measurement station in the ecological-botanical garden with a psychrometer and an HMP 45. This data subsequently is saved in an online database. The temperature series at the height of 2m and 5cm are particularly important for the research in the dynamics of the frost. These temperature series are analyzed and evaluated with the computer software "R".

Overall, the global warming is mirrored in the results. The distribution of the temperature of the two temperature series is very similar to each other over the year. Big differences in the two temperature series are noticed in the longest ongoing freeze period; however there is no visible trend. Also, there seems to be no significant changes for the coldest day of the year and the temperature of this day. The analysis of the mean freeze temperature shows a pretty clear increase of the temperature at the height of 5cm. However, at the height of 2m there is no significant trend for this. No safe assumptions can be made for the distribution of frost events and the number of changes of periods between freeze period and non-freeze period. Again, big differences are found in the analysis of the first and last frost day of the two temperature series. The frost days particularly for the temperature at the height of 5cm seem to move to later first frost days and earlier last frost days over the course of the years. This gets confirmed with the analysis of the frost-free period, which shows significant increases for the duration of the frost-free period for the temperature at the height of 5cm. This increase, however, isn't mirrored at the temperature at the height of 2m.

It is recommended to continue the research in the future, because of the low amount of data a lot of the results cannot be confirmed with certainty. Possible actions for the protection of the plants should already be concluded, because it is very probable that the temperature will rise in the future, which also leads to changes in the dynamics of the frost.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	4
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	5
<b>1. Einleitung</b> .....	6
1.1. Klimawandel als weltweites Phänomen.....	6
1.2. Regionale Temperatur.....	8
1.3. Kältestress bei Pflanzen.....	9
1.4. Ziel der Arbeit.....	10
<b>2. Material und Methoden</b> .....	11
2.1. Der ökologisch-botanische Garten.....	11
2.2. Verwendete Messgeräte.....	13
2.2.1. Psychrometer.....	13
2.2.2. HMP 45.....	13
2.3. Analyse der Daten.....	14
<b>3. Auswertung und Diskussion</b> .....	16
3.1. Überblick.....	16
3.2. Längste anhaltende Frostperiode.....	17
3.3. Kältester Tag im Jahr.....	18
3.4. Durchschnittliche Frosttemperatur.....	19
3.5. Verlauf von Frostereignissen.....	20
3.6. Erster und letzter Frosttag.....	21
3.7. Dauer der frostfreien Periode.....	22
<b>4. Schlussfolgerungen</b> .....	23
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	24
<b>Anhang</b> .....	25
<b>Danksagung</b> .....	27
<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	28

# 1. Einleitung

## 1.1. Klimawandel als weltweites Phänomen

Es gibt viele Faktoren, die das weltweite Klima beeinflussen. Darunter zählen natürliche Ursachen wie beispielsweise die Neigung der Erdachse, der Vulkanismus oder Veränderungen der Meeresströmungen. Das Klima wird allerdings auch durch den Menschen beeinflusst. Mit Abstand am meisten verantwortlich für die globale Erwärmung sind die sogenannten Treibhausgase, die hauptsächlich durch Menschen produziert werden. Zu diesen zählen hauptsächlich Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan und Ozon (Kiehl und Trenberth, 1997).

Die natürlichen Ursachen der globalen Erwärmung neutralisieren sich größtenteils gegenseitig. Dadurch fallen die durch den Menschen verursachten Treibhausgase stärker ins Gewicht und sind somit sehr wahrscheinlich die Ursache dafür, dass es überhaupt zu einer kontinuierlichen Erwärmung kommt (IPCC, 2013).

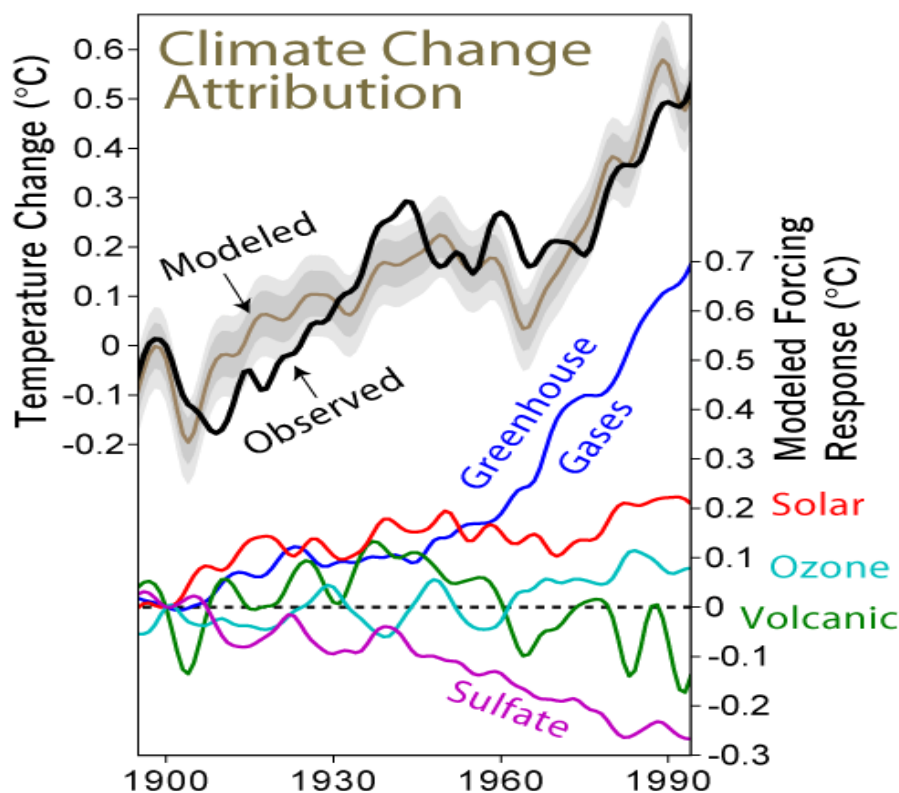


Abbildung 1: Gewichtung der verschiedenen anthropogenen und natürlichen Ursachen des Klimawandels. Man betrachte, dass die natürlichen Ursachen (rot, hellblau, grün und violett) sich über einen längeren Zeitraum betrachtet neutralisieren. Der Temperaturanstieg (schwarz) ist also letztendlich nahezu identisch zum Anstieg der Treibhausgase (blau). (Abbildung aus Rohde)

Die Treibhausgase spielen für den Wärmehaushalt der Erde eine wichtige Rolle. Die kurzwellige Sonneneinstrahlung ist in der Lage die Treibhausgase vollständig zu durchdringen. Die Sonneneinstrahlung wandelt sich an der Erdoberfläche dann jedoch in langwellige Infrarotstrahlung um, die von den Treibhausgasen in der Atmosphäre absorbiert wird. Dadurch kommt es zur Gegenstrahlung und die von der Sonneneinstrahlung verursachte Wärme kann somit nur schwer entweichen. Diese Gegenstrahlung wird vom Boden absorbiert und führt damit zu einer Erwärmung. Dabei wird die Gegenstrahlung umso stärker, je mehr Treibhausgase sich in der Atmosphäre befinden.

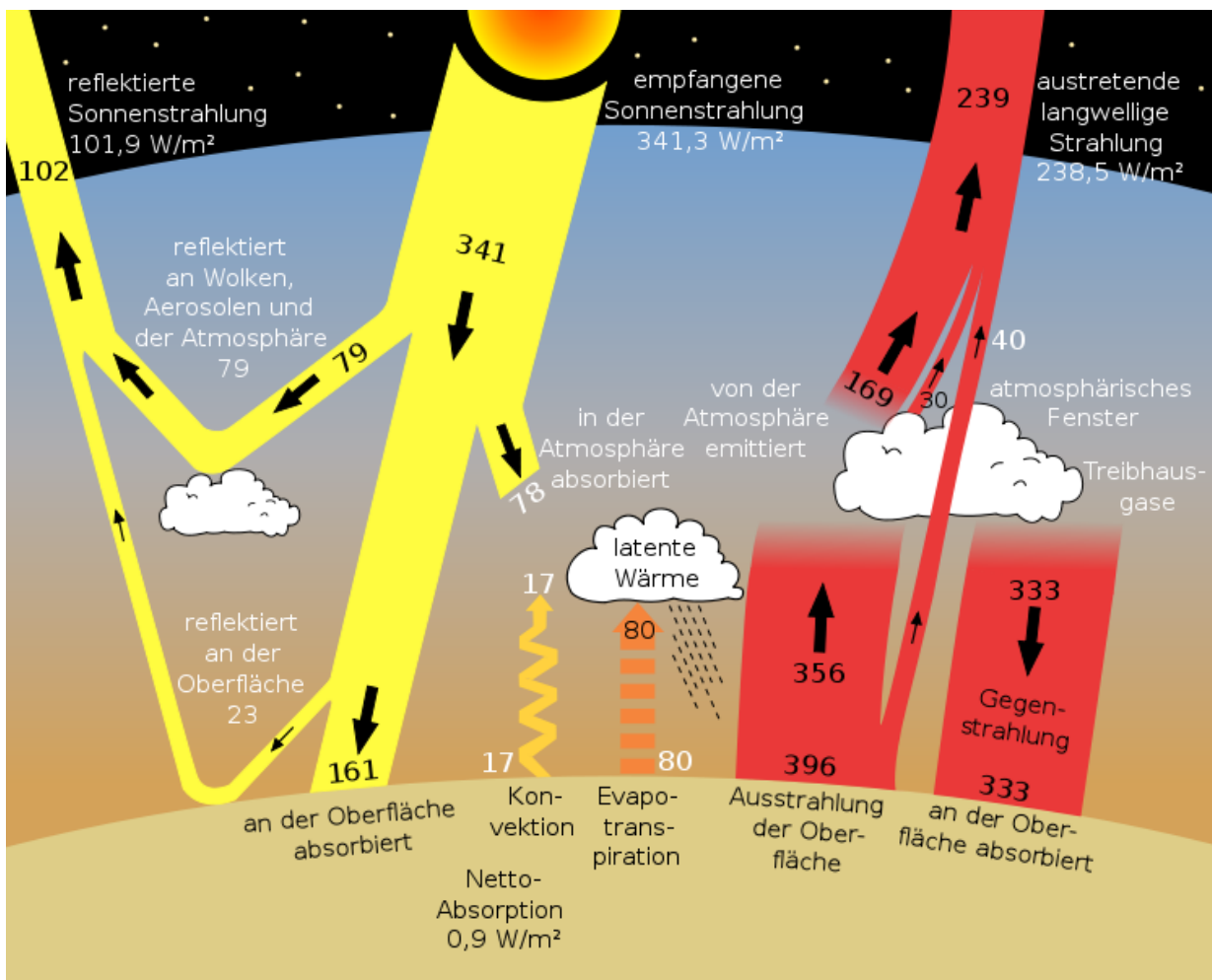


Abbildung 2: Einstrahlung und Ausstrahlung an der Erdoberfläche. Die von der Sonne erhaltene Strahlung wird zu knapp 50% an der Erdoberfläche absorbiert und anschließend in Infrarotstrahlung umgewandelt, die nur begrenzt in die Atmosphäre entweichen kann. Zurück bleibt die von den Treibhausgasen verursachte Gegenstrahlung. (Abbildung aus Kiehl et al., 2009)

Insgesamt hat sich in den letzten 50 Jahren (1956-2005) die Temperatur weltweit durchschnittlich um 0,13 Kelvin pro Jahrzehnt erhöht (Solomon et al., 2007).

Dies zieht massive Folgen für Menschen, Tiere und Pflanzen nach sich. Beispielsweise verschieben sich die Jahreszeiten; der Frühling beginnt in klimatischer Sicht um bis zu zwei Wochen früher. Dies wird durch das Wanderverhalten der Zugvögel bestätigt. Auch bei anderen Tierarten sind Veränderungen der Verhaltensweisen aufgefallen; saisonabhängige Verhaltensweisen sind nun jedes Jahrzehnt um bis zu 4,4 Tage früher zu beobachten (Union of Concerned Scientists, 2005 und Root et al., 2005).

Auch die Pflanzen sind durch den zeitiger eintretenden Frühling betroffen. Laut Schwartz et al. (2006) verschiebt sich in der Nordhemisphäre der erste Blatttag um -1,2 Tage pro Dekade und der erste Blütentag um -1,0 Tage pro Dekade. Untersucht wurde der Zeitraum zwischen 1955 und 2002. Besonders wenn die letzten Frostereignisse sich nicht nach vorne verschieben, können hier Schäden für die Pflanzen entstehen.

## 1.2. Regionale Temperatur

Die globale Erwärmung lässt sich natürlich auch direkt in Bayreuth beobachten. Hierfür wurde laut Lüers et al. (2014) das Klima seit 1851 genau untersucht. Besonders interessant für den Vergleich mit der globalen Erwärmung sind die Ergebnisse der Minimal-, Durchschnitts- und Maximaltemperatur.

Laut Lüers et al. (2014) gibt es keinen signifikanten Anstieg der Minimaltemperatur zu beobachten. Allerdings ist ein starker Aufwärtstrend der Maximaltemperatur besonders für die Jahre ab 1945 festzustellen. Dadurch steigt auch die Durchschnittstemperatur leicht an, die sich insgesamt um etwa ein Kelvin verändert.

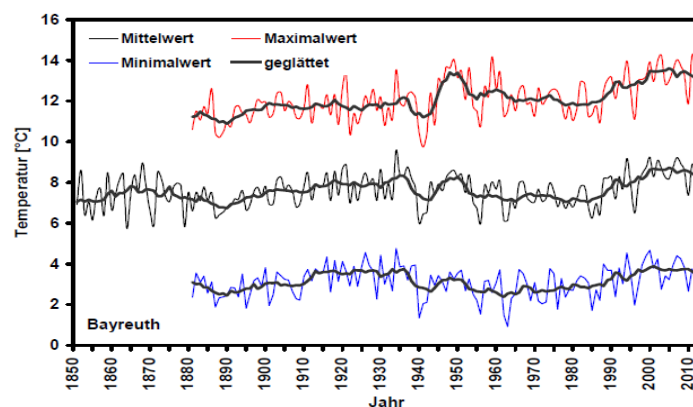


Abbildung 3: Veränderung der Temperatur seit 1851. Besonders die Maximaltemperatur weist einen Trend nach oben auf. (Abbildung aus Lüers et al., 2014)



Laut der deutschen Presse-Agentur (2015) ist ganz Bayern durch die globale Erwärmung stark betroffen. So soll die Temperatur bis zum Ende des Jahrhunderts um 4,5 Kelvin ansteigen. Schnee- und Eistage (Tage, an denen die Temperatur komplett unter 0°C bleibt) sollen deutlich abnehmen.

Dies wird nochmals durch den bayrischen Rundfunk (2016) bestätigt. Hier heißt es, dass die Durchschnittstemperatur im letzten Jahrhundert um ein Kelvin gestiegen ist. Dies stimmt mit den Beobachtungen in Lüers et al. (2014) überein.

### 1.3. Kältestress bei Pflanzen

Die Temperatur ist ein wichtiger Faktor für alle Pflanzen. Bei zu niedrigen Temperaturen kommt es für die Pflanzen zum Kältestress, der ein großes Risiko für die Pflanzen darstellt. Chemische Prozesse laufen bei niedrigeren Temperaturen langsamer und somit sinkt der Energiegewinn aus dem Betriebsstoffwechsel und auch die Wasser- und Nährstoffaufnahme wird reduziert. Dies wiederum hemmt das Wachstum.

Bleibt die Temperatur längerfristig auf einem zu niedrigen Niveau entstehen für die Pflanze auch irreversible Schäden. Da der Stoffwechsel bei zu niedrigen Temperaturen nicht im Gleichgewicht gehalten werden kann, führt dies zur Anreicherung von Stressmetaboliten und toxischen Stoffwechselprodukten innerhalb der Pflanze. Bleibt die Kälte weiterhin bestehen werden Zellen, Organe und schließlich die ganze Pflanze absterben.

Das Entstehen von Frost (durch Temperaturen unter 0°C) birgt weitere Gefahren für die Pflanzen. Eis entsteht zuerst an Orten, die am schnellsten abkühlen. Dies sind hauptsächlich die exponiertesten Teile der Pflanze wie Blätter oder Nadeln. Von dort aus schreitet die Eisbildung dann bis ins innere Gewebe fort. Da die Dichte von gefrorenem Wasser höher ist, werden durch das Entstehen von Eis wichtige Strukturen in den Pflanzenzellen zerstört. Zusätzlich führt das Entstehen von Eis auch zu einer Austrocknung der Pflanze, da gefrorenes Wasser nicht mehr für Stoffwechselfvorgänge zur Verfügung steht. Dadurch werden die Pflanzen ebenfalls irreversibel geschädigt und bei länger anhaltendem Frost kann es ebenfalls zum Absterben kommen.

Verschiedene Pflanzen haben jedoch verschiedene Frost- und Temperaturreisistenzen. Viele tropische Pflanzen stehen schon ab 10°C unter Kältestress und haben auch keinerlei Schutzmechanismen gegen die Entstehung von Frost. Pflanzen aus kühleren Gegenden, wie beispielsweise einem Hochgebirge, sind dagegen resistenter (Larcher, 1994 und Schopfer und Brennicke, 2006).

## 1.4. Ziel der Arbeit

Aufgrund der globalen Erwärmung ist zu erwarten, dass sich die Frostereignisse im ökologisch-botanischen Garten verändern. In dieser Arbeit wird anhand von Zeitreihen untersucht, ob es aufgrund des Trends der globalen Erwärmung auch eine Beeinflussung der Frostereignisse im ökologisch-botanischen Garten zu beobachten gibt.

Insgesamt wäre zu erwarten, dass die Frostperiode kürzer und unregelmäßiger wird. Auch sollte das erste Frostereignis später und das letzte Frostereignis früher auftreten. Dies wurde auch in Schwartz et al. (2006) beobachtet, wo sich in der Nordhemisphäre der letzte Frosttag um -1,5 Tage pro Dekade verschiebt. Auch die Beobachtungen in Lüers et al. (2014) bestätigen, dass die Durchschnittstemperatur in Bayreuth steigt. Eine weitere große Bedeutung für die Pflanzen haben außerdem Extremtemperaturen. Für manche Pflanzen bedeutet eine extrem niedrige Temperatur, sei es nur für ein paar Stunden, das Absterben der Pflanze.

Der ökologisch-botanische Garten der Universität Bayreuth beheimatet viele verschiedene Pflanzen aus vielen verschiedenen Teilen der Erde. Vor allem Pflanzen aus wärmeren Gegenden haben Probleme den Winter zu überstehen und befinden sich daher während der kalten Periode im Gewächshaus.

Durch die im ökologisch-botanischen Garten vorhandene Messstation werden ortsnah Daten erfasst, mit denen die Klimabedingungen für die Pflanzen genau untersucht werden können. Die Station wird regelmäßig gewartet, um sicherzustellen, dass die Daten keine Fehler enthalten. Besonders die Lufttemperatur in Bodennähe und in 2m Höhe werden hier von Bedeutung sein.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind besonders wichtig für die Beschäftigten des ökologisch-botanischen Garten und somit auch für die Pflanzen, um beispielsweise abschätzen zu können, wann die Pflanzen aufgrund des Frostrisikos in das Gewächshaus gebracht werden müssen. Zudem lässt sich mithilfe von Trends eventuell vorhersagen, ob bei bestimmten Pflanzenarten in Zukunft eine Gefährdung auftritt.

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Der ökologisch-botanische Garten

Die Daten für die Berechnungen wurden von der Messstation im ökologisch-botanischen Garten gewonnen. Diese befindet sich am südlichen Stadtrand von Bayreuth und liegt in etwa 365m über dem Meeresspiegel. Die Hauptwetterstation befindet sich dabei in dem Bereich "Nordamerika" des Ökologisch-botanischen Garten. Die geographische Position ist 49°55'45" Nord und 11°35'10" Ost (Lüers et al., 2014).

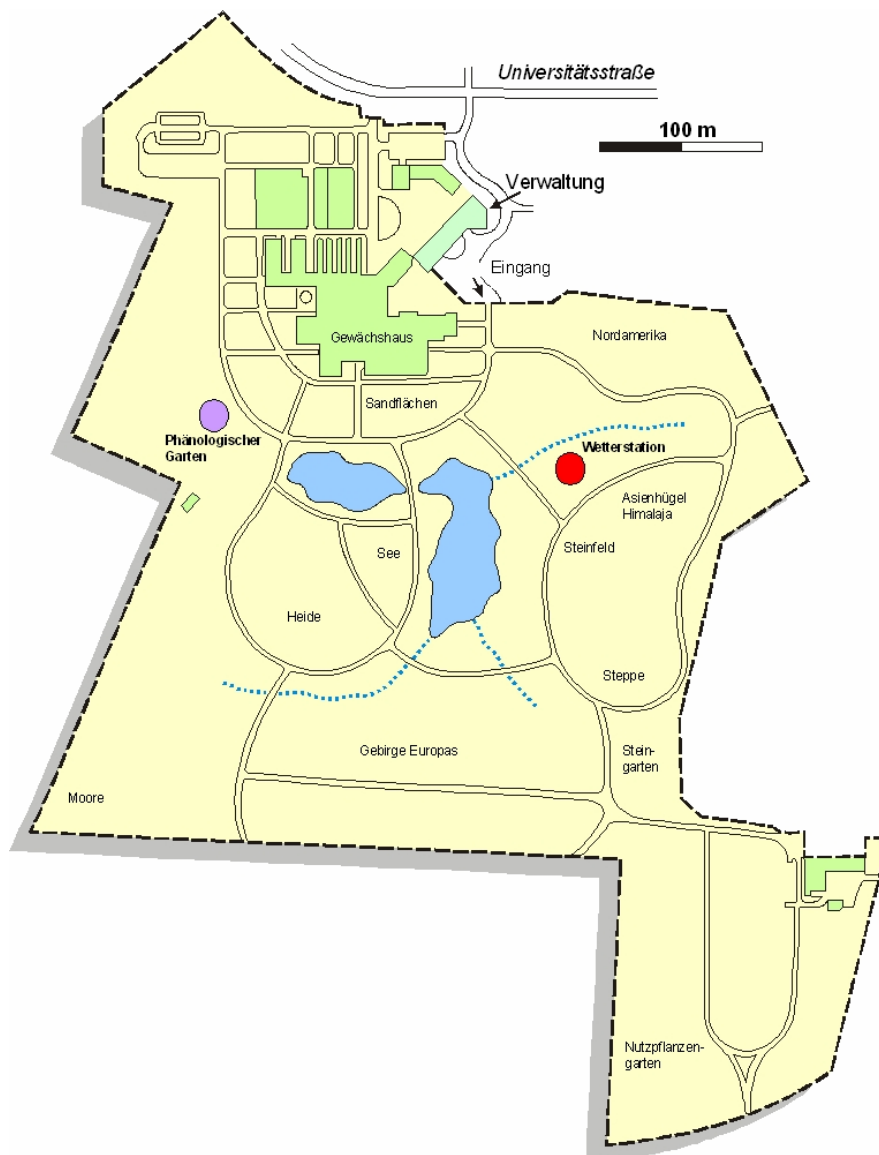


Abbildung 4: Karte des Ökologisch-botanischen Garten und Standort der Messstation (Abbildung aus Lüers et al., 2014)

Die Wetterstation wird seit 1997 durch die Abteilung Mikrometeorologie betreut. Zuständig dafür sind aktuell Prof. Dr. Christoph Thomas und Dr. Wolfgang Babel (bis 2014: Prof. Dr. Thomas Foken und Dr. Johannes Lüers) messtechnische Betreuung erfolgt durch Johannes Olesch. Jede Sekunde werden die Werte von einem Datenloggersystem ausgelesen und anschließend zu 10 Minuten Mittelwerten zusammengefasst. Diese werden dann in die BayEOS-Datenbank übertragen. Für diese Arbeit wurden die 5cm-Temperaturwerte und die 2m-Temperaturwerte verwendet. Die 2m-Temperaturwerte stammen von einem Psychrometer (Typ: Frankenberger, Fa. Friedrichs). Zusätzlich wurden noch Daten für die 2m-Temperatur vom HMP 45A (Fa. Vaisala) für den Zeitraum zwischen 1998 und 2001 herangezogen.

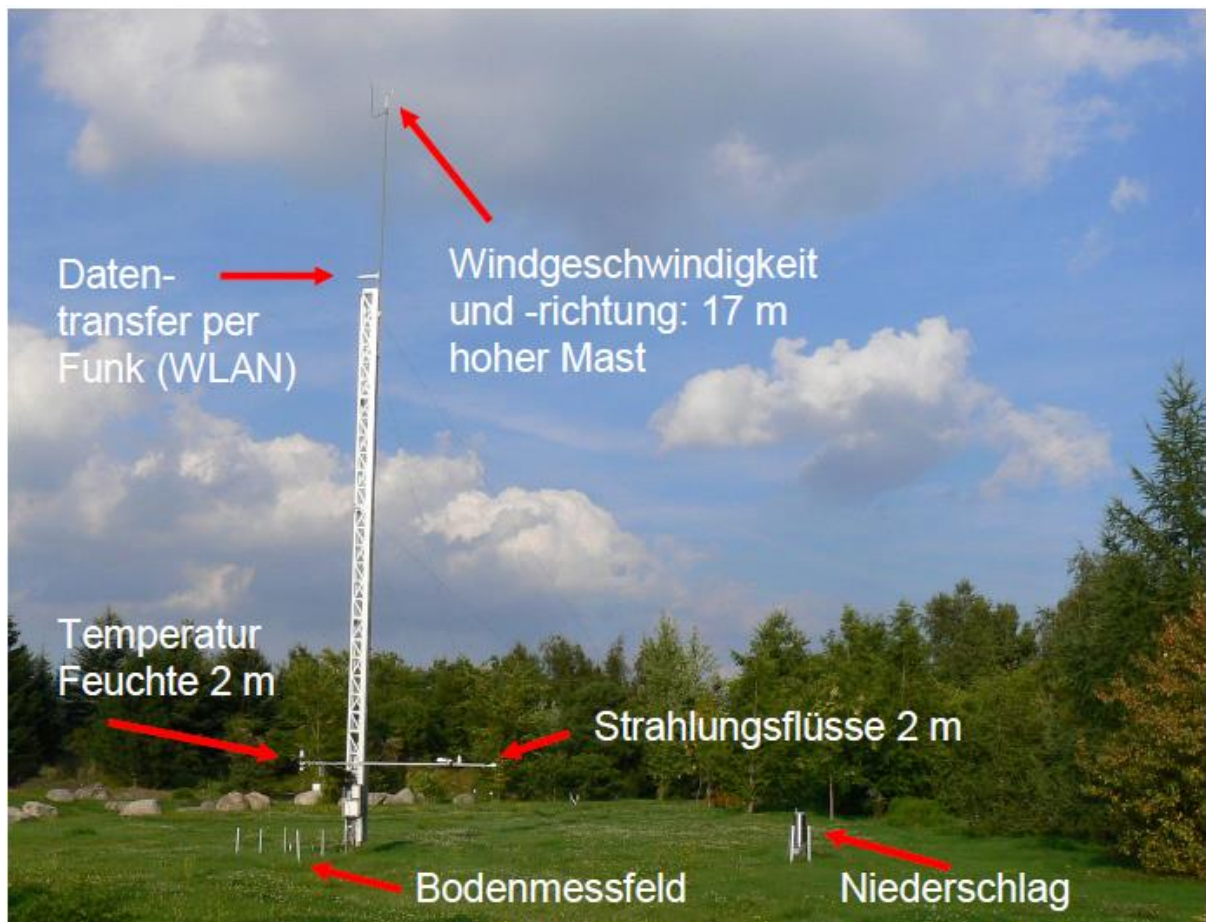


Abbildung 5: Messstation im Ökologisch-botanischen Garten und deren Ausstattung. Aktuelle Leitung: Prof. Dr. Christoph Thomas und Dr. Wolfgang Babel (Abbildung aus Lüers et al., 2014)

## 2.2. Verwendete Messgeräte

### 2.2.1. Psychrometer

Ein Psychrometer besteht aus zwei separaten Thermometern. Über eine Widerstandsmessung der in die Thermometer eingebauten PT 100 Sensoren können damit die Trockentemperatur und die Feuchttemperatur gemessen werden. Eines der Thermometer ist mit einem nassen Material (Mullstrumpf oder Baumwollstrumpf) umwickelt. Das Verdunsten des in dem nassen Material enthaltenen Wassers führt zu einer Abkühlung der Umgebungsluft. Gleichzeitig kondensieren die freien Wassermoleküle aus der Luft an dem nassen Material und sorgen für eine Erwärmung. Je nach Grad der Luftfeuchte kondensieren daher mehr Wassermoleküle. Die Trockentemperatur ist immer höher als die Feuchttemperatur (Theodor Friedrichs und Co.).

In dieser Arbeit wurde lediglich die Trockentemperatur verwendet.

Zusätzlich muss noch beachtet werden, dass es aufgrund der Sonneneinstrahlung zu falschen Messergebnissen kommen kann. Diese führen nämlich zu Erwärmungen der Thermometer selbst. Deshalb wird in der Regel ein Strahlungsschutz aufgestellt. Hier muss jedoch sichergestellt werden, dass dieser ausreichend belüftet wird, da ansonsten ein Wärmestau entstehen kann, was wiederum zu falschen Ergebnissen führt (Foken, 2003).

Das Psychrometer in 2m Höhe im ökologisch-botanischen Garten besitzt sowohl einen Strahlungsschutz, als auch eine Belüftung. Das Thermometer in 5cm Höhe (ebenfalls mit einem PT 100 Sensor ausgestattet) jedoch hat keinen Strahlungsschutz. Dadurch kommt es während des Tages zu verfälschten Messungen. Die Minimumtemperaturen treten jedoch in der Regel nur nachts auf, wodurch diese ohne Bedenken verwendet werden können.

### 2.2.2. HMP 45

Das HMP 45 ist ebenfalls in der Lage die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit zu messen. Im Gegensatz zum Psychrometer kann es jedoch nur den Temperaturbereich zwischen -40°C und 60°C messen. Die Messung erfolgt auch hier wieder über eine Widerstandsmessung (PT 1000 Sensoren) (Vaisala, 2006).

Das HMP 45 im ökologisch-botanischen Garten ist mit der passiv belüfteten Wetterhütte von Young ausgestattet. Dadurch kommt es besonders bei geringen Windgeschwindigkeiten zu Strahlungsfehlern.

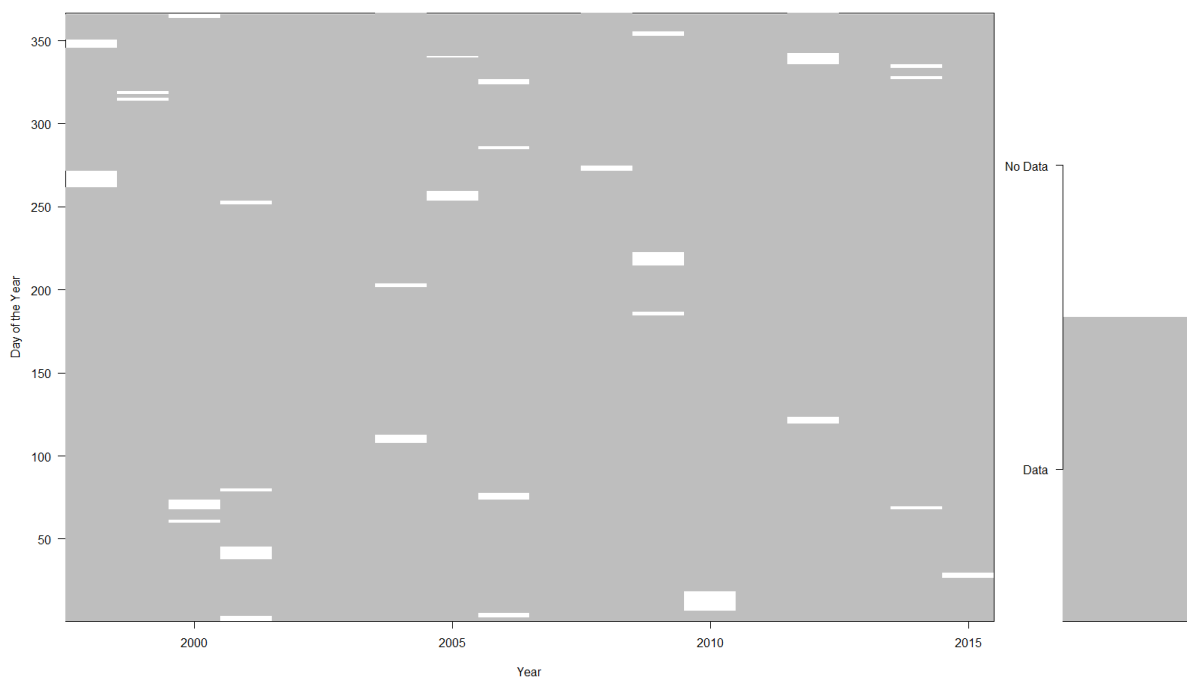
### 2.3. Analyse der Daten

Die Daten wurden von dem BayCEER von der Universität Bayreuth mithilfe der "BayEOS"-Datenbank bereitgestellt. Mit dem Computerprogramm "R" von dem R Development Core Team wurden die Daten anschließend heruntergeladen und bearbeitet. Insgesamt wurden dabei drei Datenreihen verwendet; die Datenreihe für die Temperatur in 5cm Höhe und beide Datenreihen für die Temperatur in 2m Höhe. Die Datenreihe der 5cm Lufttemperatur beginnt 2001. Für die 2m Temperatur wurden zwei Datenreihen zusammengefügt; die Datenreihe des HMP 45 deckt hierbei die Jahre 1998 bis 2001 ab, während der Zeitraum danach von dem Psychrometer übernommen wird. Dabei wurde überprüft ob die Daten von dem HMP 45 und dem Psychrometer übereinstimmen. Die größten Unterschiede bei den beiden Geräten betragen etwa 2 Kelvin. Großteils gehen die Messwerte der beiden Datenreihen jedoch weniger als einen halben Kelvin auseinander. Daher wurden die Datenreihen des HMP 45 zwischen 1998 und 2001 an die Datenreihen des Psychrometers angehängt. Anschließend wurden die Werte von den beiden Datenreihen zu Tagesmittelwerten und Tagesminimumwerten zusammengefasst.



*Abbildung 6:* Ausschnitt aus dem Temperaturverlauf der Datenreihen Psychrometer und HMP45. Man betrachte, dass die rote Linie des HMP45 fast vollständig von der grünen Linie des Psychrometers überdeckt wird; ein Zeichen dafür, dass die Daten nahezu identisch sind.

Leider musste auch festgestellt werden, dass einige Messwerte fehlen und öfter Datenlücken von mehreren Tagen vorhanden sind. Dies kann auf mehrere Gründe zurückzuführen sein, wie beispielsweise eine Fehlfunktion der Geräte, ein Stromausfall oder ein Blitzeinschlag. Da eine Interpolation bei einem Großteil der Untersuchungen zu falschen Ergebnissen geführt hätte, wurden diese Datenlücken nicht gefüllt. Lediglich bei dem Feststellen der längsten durchgehenden Frostperiode wurde interpoliert, indem abgeschätzt wurde, ob die Temperatur in den Tagen mit Datenlücken ein Minima unter  $0^{\circ}\text{C}$  hatte. Insgesamt fehlen bei der 2m-Temperatur 0,5% der Daten und bei der 5cm-Temperatur sogar nur 0,4% der Daten.



*Abbildung 7:* Darstellung der Datenlücken der 2m-Temperatur. Die weißen Abschnitte kennzeichnen Tage an denen mehr als 50% der Messwerte fehlen.

Weitere Messungenauigkeiten sind allerdings auch durch den Schneefall im Winter entstanden. Das Messgerät für die 5cm Temperatur kann durch starken Schneefall komplett eingedeckt werden. Dadurch entstehen Messdaten, die sich nur leicht unter  $0^{\circ}\text{C}$  befinden und keinerlei Schwankungen aufweisen. Hätte man dies ignoriert, wäre es zu Fehlinterpretationen gekommen. Da Schneebedeckung einer Temperatur unter  $0^{\circ}\text{C}$  gleichkommt, wurden diese Tage jedoch trotzdem als Frosttage mitgerechnet. Als Frosttage sind in dieser Arbeit Tage definiert, in denen das Minimum der Lufttemperatur unter  $0^{\circ}\text{C}$  gelegen hat.

# 3. Auswertung und Diskussion

## 3.1. Überblick

Um sich einen guten Überblick über die beiden Temperaturreihen zu machen, wurde jeweils ein Hovmöller-Plot zu den Minimaltemperaturen erstellt. Bei dem Vergleich der beiden Hovmöller-Plots sieht man, dass der Trend der beiden Temperaturreihen großteils übereinstimmt. Lediglich im Winter gibt es teilweise besonders große Unterschiede in den Hovmöller-Plots zu bemerken; dies liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an Messfehlern durch die Schneebedeckung. Außerdem scheint die 5cm-Minimumtemperatur etwas träger mit den Temperaturveränderungen zu sein. Extremereignisse wie besonders warme oder kalte Tage stechen im Vergleich weniger heraus.

Insgesamt lässt sich sagen, dass im Januar und Februar die kältesten Temperaturen zu verzeichnen sind. Die Frostmonate sind hauptsächlich Dezember bis März. Vereinzelt Frostereignisse können jedoch schon ab Anfang September und bis Mitte Juni auftreten. Diese erreichen aber in der Regel kein Temperaturminimum unter  $-8^{\circ}\text{C}$ .

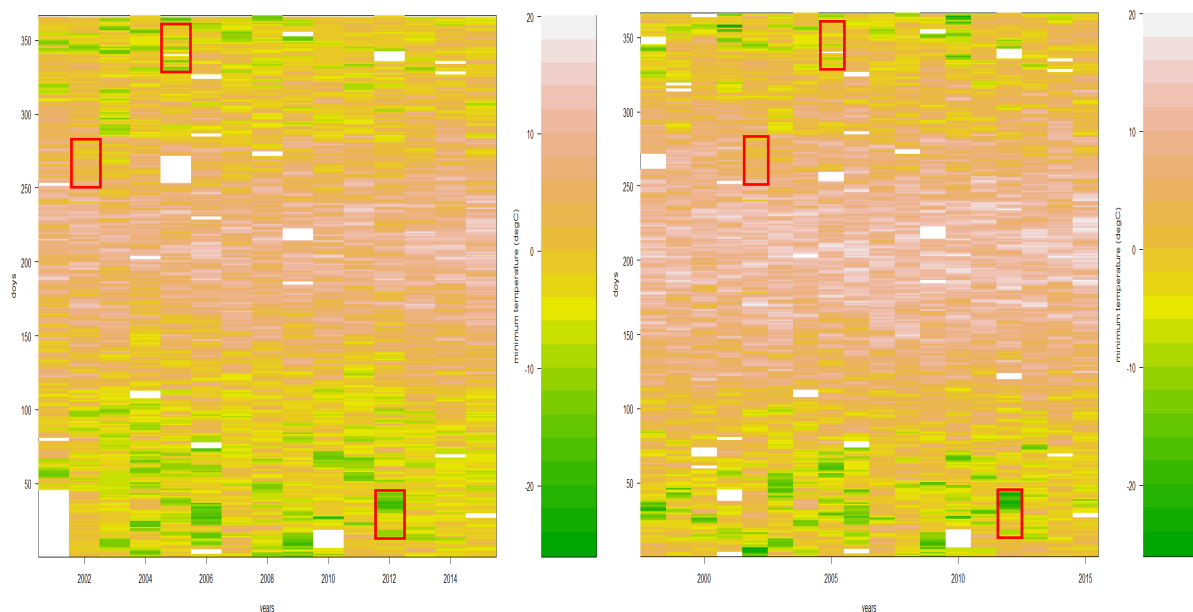


Abbildung 8: Hovmöller-Plots zu den Minimumtemperaturen in 5cm Höhe (links) und 2m Höhe (rechts). Als Beispiel wurden je 3 Abschnitte aus dem selben Zeitraum markiert, um den Zusammenhang der beiden Temperaturreihen darstellen zu können.



### 3.2. Längste anhaltende Frostperiode

Die Datenreihen wurden auf die längste durchgehende Frostperiode je Winterjahr (Anfang Juli bis Ende Juni) untersucht.

Sehr auffallend ist auf den ersten Blick, dass die Temperatur in 5cm Höhe in jedem Jahr, mit Ausnahme von 2001/2002, länger unter 0°C bleibt als die Temperatur in 2m Höhe. Dies lässt sich vermutlich unter Anderem auf die Witterungsbedingungen zurückführen. Das Messgerät in 5cm Höhe kann durch starken Schneefall komplett eingeschneit werden und misst dann nur noch die Temperatur des Schnees. Dies führt zu Messwerten leicht unter 0°C. Das Messgerät in 2m Höhe kann jedoch im Vergleich dazu nicht eingeschneit werden. Dadurch entsteht an Tagen, an denen es eigentlich nicht zu Temperaturen unter 0°C kommt, durch die Schneebedeckung ein Puffer und somit hält sich der Frost am Boden stabiler.

Des Weiteren wäre zu erwarten, dass sich aufgrund der globalen Erwärmung ein Trend in Richtung kürzerer Frostperioden entwickelt. Dies konnte durch die Daten nicht bestätigt werden (p-Value für 5cm und 2m Temperatur: 0,23 und 0,74), allerdings wären für eine aussagekräftige Behauptung auch längere Datenreihen notwendig.

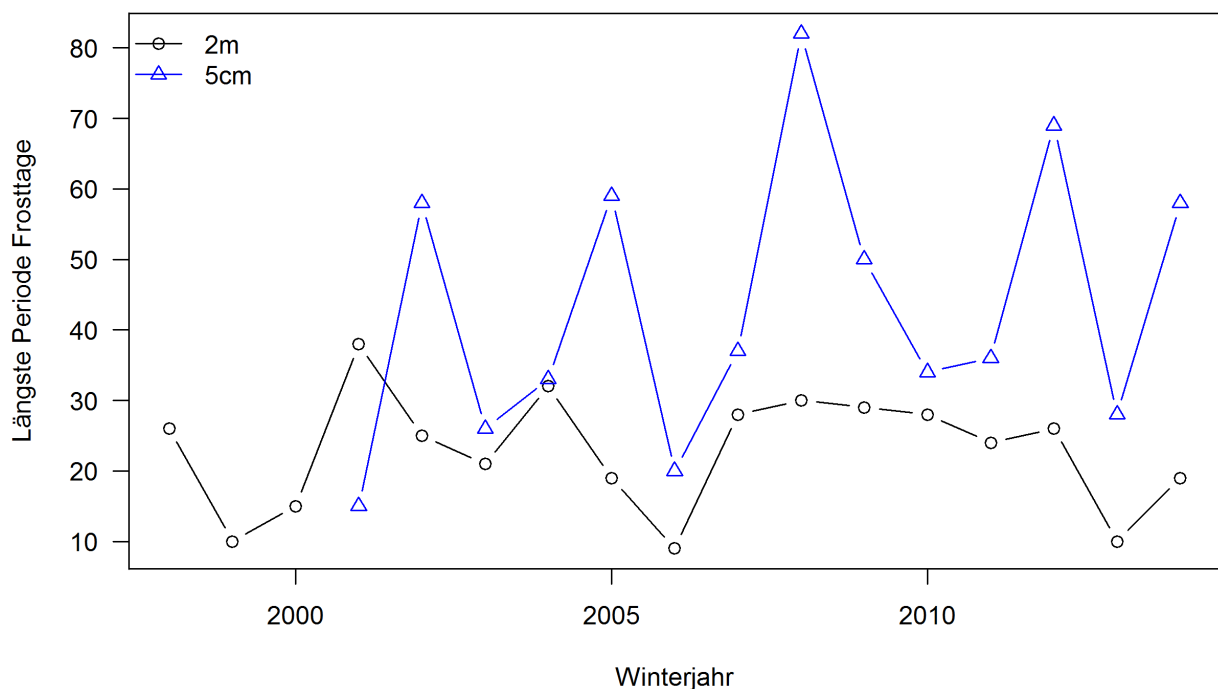


Abbildung 9: Verlauf der längsten durchgehenden Frostperiode (Tage mit Minimalwerten unter 0°C)

### 3.3. Kältester Tag im Jahr

Auch der kälteste Tag im Jahr wurde genau untersucht. Hier schwanken die Daten ebenfalls sehr stark. Generell wäre aufgrund der globalen Erwärmung zu erwarten, dass Extremereignisse wie sehr kalte Temperaturen weniger extrem ausfallen. Bei der Untersuchung von dem Graphen mit der kältesten Temperatur konnte dies allerdings nicht bestätigt werden, da hierfür nicht genügend Daten zur Verfügung stehen (p-Value für 5cm und 2m Temperatur: 0,52 und 0,72).

Bei genauer Betrachtung lässt sich jedoch ein Zusammenhang zwischen den beiden Graphen bilden. In Jahren, in welchen der kälteste Tag auf dasselbe Datum fällt, weicht die Minimaltemperatur in 2m Höhe und 5cm Höhe kaum voneinander ab. Dies lässt sich leicht erklären. In Jahren, in denen die Temperatur aus derselben Frostperiode stammt, ist es wahrscheinlich, dass die kälteste Temperatur für beide Geräte kaum voneinander abweicht. Die kälteste Temperatur aus dieser Frostperiode ist dann für beide Messgeräte am gleichen Tag. Dies bestätigt außerdem zu einem gewissen Grad, dass die Geräte richtig funktionieren. In vielen Jahren jedoch weicht das Datum des kältesten Tages stark voneinander ab. Dies lässt sich eventuell ebenfalls durch den Schneefall erklären. Sobald das Messgerät in 5cm Höhe eingeschneit ist, können extrem kalte Temperatur nicht mehr gemessen werden, da der Schnee die Temperatur konstant bei leicht unter 0°C hält.

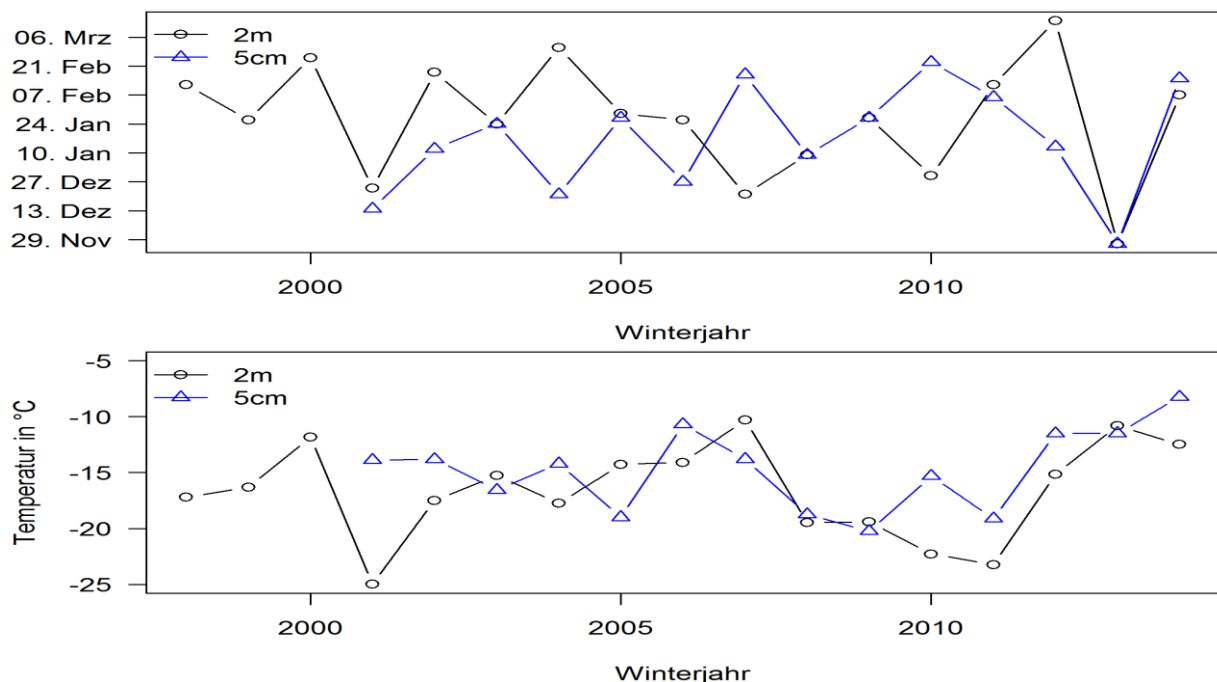


Abbildung 10: Verlauf des Zeitpunktes der kältesten Temperatur (oben) und der Temperatur des kältesten Tages im Winterjahr (unten)

### 3.4. Durchschnittliche Frosttemperatur

Die Datenreihen wurden auf Schwankungen der durchschnittlichen Minimaltemperaturen der Frosttage (Frosttemperatur) untersucht. Der Mittelwert in 5cm Höhe beträgt hierbei  $-4,14^{\circ}\text{C}$  und in 2m Höhe  $-4,23^{\circ}\text{C}$ .

Trotz des nahezu gleichen Mittelwertes gibt es, auf einzelne Jahre betrachtet, große Unterschiede der durchschnittlichen Frosttemperatur. Auch der Trend weicht oft voneinander ab; beispielsweise im Winterjahr 2003 steigt die durchschnittliche Frosttemperatur in 2m Höhe um  $1,5^{\circ}\text{C}$  im Vergleich zum Vorjahr, während die Frosttemperatur in 5cm Höhe um etwa  $1^{\circ}\text{C}$  sinkt.

Insgesamt betrachtet geht der Trend für beide Messhöhen in Richtung wärmerer Frosttemperaturen. Besonders die letzten drei Winterjahre weisen besonders hohe Frosttemperaturen auf. Jedoch kann der Anstieg aufgrund der geringen Datenmenge zumindest für die 2m Temperatur nicht mit Sicherheit bestätigt werden (p-Value für 5cm und 2m Temperatur: 0,06 und 0,3). Der Trend zu wärmeren Frosttemperaturen stimmt auch nicht mit den in Lüers et al. (2014) präsentierten Ergebnissen zur Erhöhung der Minimaltemperaturen überein.

Beim Vergleich von der kältesten Temperatur in der Abbildung 10 mit der durchschnittlichen Frosttemperatur in Abbildung 11 fällt überraschenderweise auf, dass der Trend der Temperatur in 5cm Höhe aus den beiden Abbildungen großteils übereinstimmt. Dies ist bei der Temperatur in 2m Höhe nicht der Fall. Daraus kann man ableiten, dass die Frosttemperaturen in 2m Höhe vermutlich deutlich größeren Schwankungen unterliegen. Dies kann unter Anderem mit der Luftzirkulation begründet werden. Die Temperatur in 5cm Höhe ist aufgrund der Nähe zum Boden resistenter gegenüber Einflüsse durch Windereignisse.

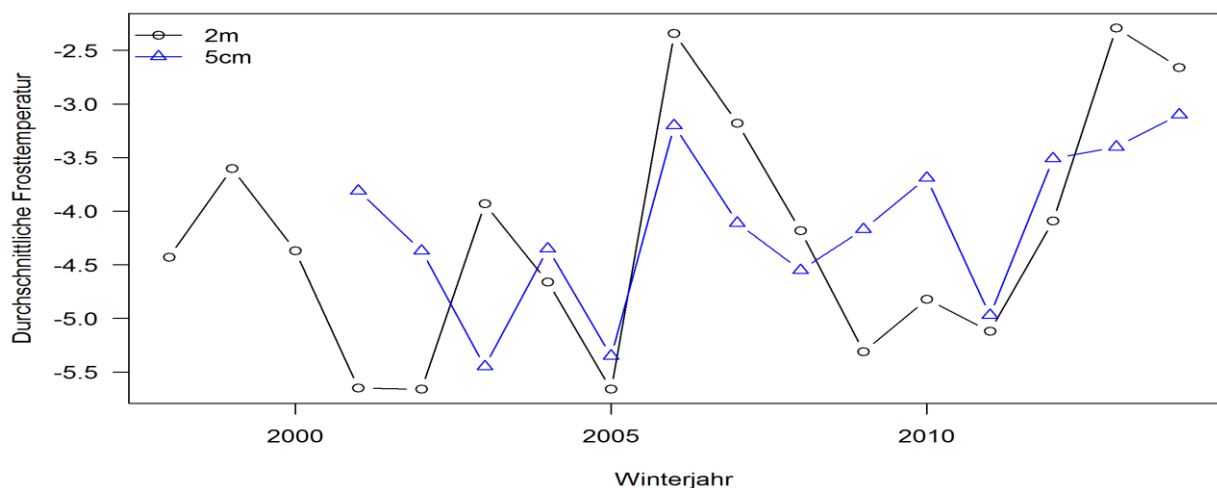


Abbildung 11: Verlauf der durchschnittlichen Minimaltemperatur der Frosttage

### 3.5. Verlauf von Frostereignissen

Zum Verlauf von Frostereignissen wurde ebenfalls ein Hovmöller-Plot angefertigt. Allerdings wurden hier nur die Frostereignisse in 2m Höhe untersucht, da die Temperaturmessungen in 5cm Höhe durch den Schneefall verfälscht wurden. Die meisten gemessenen Temperaturen liegen hierbei zwischen 0°C und -10°C, jedoch treten in fast jedem Jahr kurze Perioden mit extrem niedrigen Temperaturen mit bis zu -25°C auf. Auch fällt auf, dass es regelmäßig, auch mitten im Winterjahr, zu frostfreien Perioden kommt.

Beim Betrachten der Anzahl der Periodenwechsel zwischen Frostperiode und frostfreier Periode fällt auf, dass die wärmeren Winterjahre (1999, 2006, 2007, 2013 und 2014) besonders viele Periodenwechsel aufweisen. Durch wärmere Winter kommt es häufiger zu Tagen ohne Frost und die Dauer der einzelnen Frostperioden wird kürzer. Dies wird auch durch die Abbildungen 9 und 11 bestätigt. Dies hat sowohl Vorteile und auch Nachteile für die Pflanzen. Wärmere Winterjahre bedeuten zwar weniger Kältestress, jedoch muss sich die Pflanze aufgrund der vielen Periodenwechsel deutlich öfters umstellen. Warme Winter können außerdem sehr schädlich für die Pflanzen sein. Laut Trudgill et al. (2005) beginnen mit dem Gesetz der Thermalzeit bestimmte Entwicklungsprozesse bei Pflanzen nach einer bestimmten Temperatursumme seit Jahresbeginn. Diese können durch warme Winter zu früh beginnen.

Insgesamt lässt sich kein Trend aus dem Hovmöller-Plot ablesen. Die Anzahl der Periodenwechsel steigt zwar ganz leicht an, aber aufgrund der geringen Datenmenge ist dieses Ergebnis nicht signifikant. Die Frostverteilung als solche verändert sich über die Winterjahre hinweg nicht.

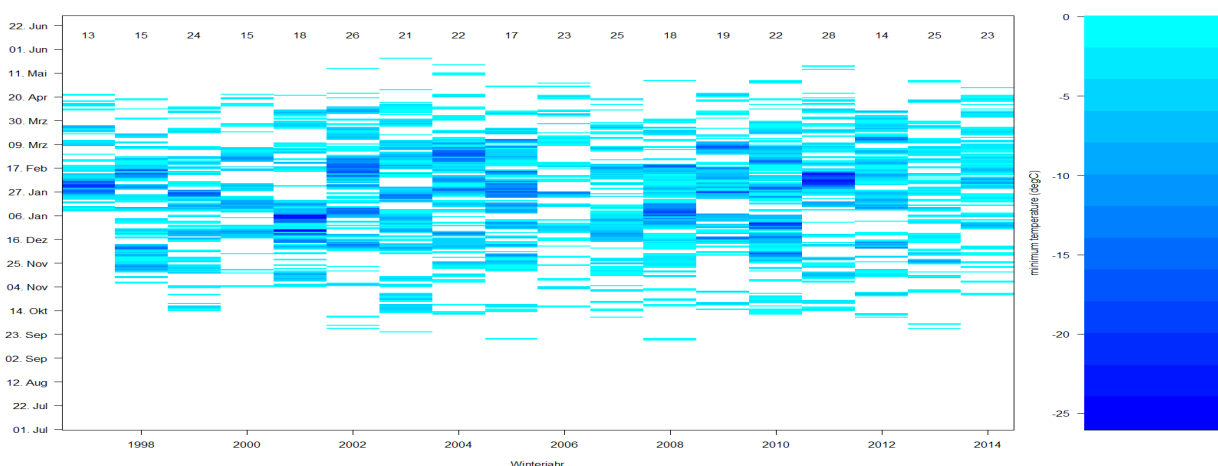


Abbildung 12: Hovmöller-Plot zum Verlauf von Frostereignissen. Für das erste Winterjahr (1997) standen nur Daten ab Mitte Januar zur Verfügung. Die Zahlen in der oberen Reihe der Abbildung geben die Anzahl der Periodenwechsel zwischen Frostperiode und frostfreier Periode für das jeweilige Winterjahr an.

### 3.6. Erster und letzter Frosttag

Für die Pflanzen ist es besonders wichtig herauszufinden, wann die Frostperiode beginnt und wann sie endet. Dies wurde ebenfalls untersucht. Üblicherweise beginnt die Frostperiode zwischen Anfang September und Anfang November und endet zwischen Mitte April und Ende Juni. Dabei ist zu beachten, dass der erste Frost in 5cm Höhe oft ein wenig früher gemessen wird als in der 2m Höhe. Dies lässt sich durch die Wetterverhältnisse erklären. Kalte Luft ist schwerer als warme Luft und in Nächten, in denen wenig Wind herrscht, kann sich diese kalte Luft aufgrund der fehlenden Durchmischung der Grenzschicht in Bodennähe gut ansammeln und weiter auskühlen. Dies kann dann zu den ersten Temperaturen unter 0°C führen, obwohl die Luft in 2m Höhe noch wenige Grad über dem Gefrierpunkt ist (Schlegelmilch, 2013).

Der letzte Frosttag in 5cm Höhe ist daher aus denselben Gründen normalerweise auch etwas später zu verzeichnen als der letzte Frosttag in 2m Höhe. Dies konnte mit den Daten bestätigt werden.

Insgesamt ergibt sich aus den Daten zwar kein Trend für die Temperatur in 2m Höhe, jedoch scheint der Trend für die Temperatur in 5cm Höhe in Richtung späterer erster Frosttage und früherer letzter Frosttage zu gehen. Besonders in den letzten 3 Jahren kann man diesen Trend in den Abbildungen sehen.

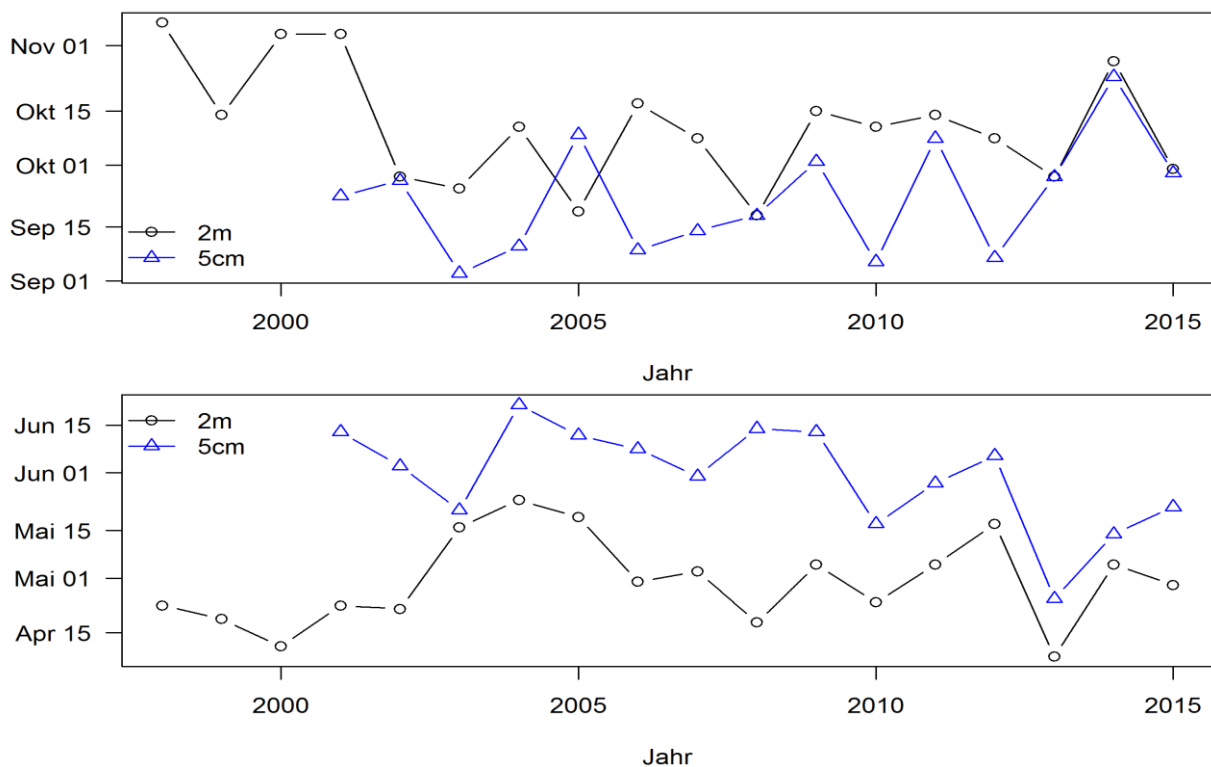


Abbildung 13: Verlauf des ersten Frosttages im Jahr (oben) und des letzten Frosttages im Jahr (unten)

### 3.7. Dauer der frostfreien Periode

Abschließend wurde noch die Dauer der frostfreien Periode genauer untersucht.

Auch hier gibt es wieder einen großen Unterschied zwischen den beiden Messhöhen. Die Temperatur in 5cm Höhe weist deutlich kürzere frostfreie Perioden auf. Dieses Ergebnis lässt sich auch in Abbildung 13 sehen, in welcher im Vergleich zu der Temperatur in 2m Höhe der letzte Frosttag später und der erste Frosttag früher auftritt.

Besonders die Dauer der frostfreien Periode in 5cm Höhe ist hierbei aber für die Pflanzen interessant. Die Pflanzen benötigen zum Wachstum und zur Vermehrung eine bestimmte Minimalanzahl an frostfreien Tagen. Wird diese Voraussetzung nicht erfüllt, schadet dies der Pflanze.

Der Trend für die beiden Temperaturreihen geht hier in verschiedene Richtungen. Während die Dauer der frostfreien Periode für die Temperatur in 2m Höhe scheinbar kürzer wird (p-Value: 0,36), ist genau das Gegenteil für die Temperatur in 5cm Höhe der Fall (p-Value: 0,04). Wegen der globalen Erwärmung ist eigentlich auch eine Steigerung der Dauer der frostfreien Periode zu erwarten. Daher ist davon auszugehen, dass es sich bei dem Trend der Temperatur in 2m Höhe um eine Anomalie handelt.

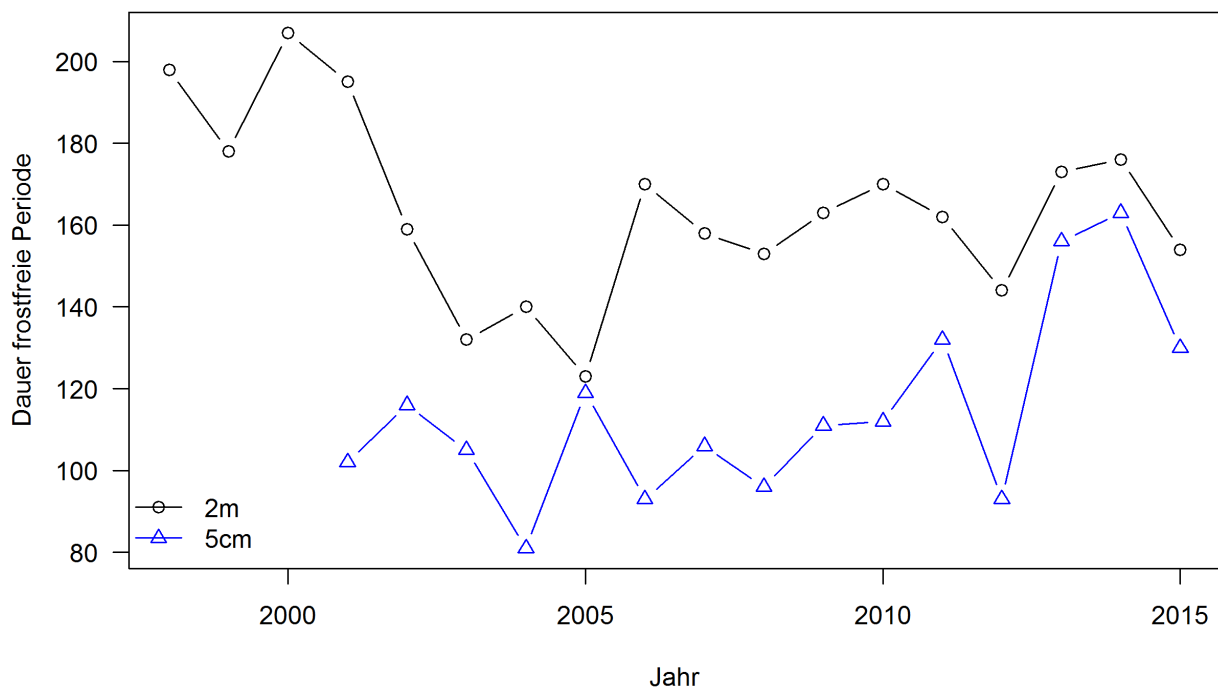


Abbildung 14: Verlauf der Dauer der frostfreien Periode

## 4. Schlussfolgerungen

Insgesamt lässt sich feststellen, dass es durchaus Veränderung im Auftreten der Frostereignisse zu beobachten gibt. Der Trend stimmt mit den Erwartungen zur globalen Erwärmung überein. Die Frostperioden werden kürzer, die durchschnittliche Frosttemperatur steigt an und auch die Extremereignisse fallen etwas schwächer aus. Der untersuchte Zeitraum war jedoch relativ kurz, weswegen es notwendig ist, den Trend für die nächsten Jahre weiterhin aufmerksam mitzuverfolgen. Zu vermuten ist allerdings, dass sich dieser Trend im Laufe der Jahre aufgrund der globalen Erwärmung noch stärker ausbildet.

Dies hat natürlich auch Auswirkungen auf die Pflanzen im ökologisch-botanischen Garten. Durch kürzere Frostperioden und wärmere Temperaturen ist es für manche Pflanzen eventuell möglich, den Winter auch ohne den Schutz des Gewächshauses zu überstehen. Im Gegenzug dazu könnte es jedoch für die Pflanzen Probleme geben, die auf Kälte angewiesen sind und zu warme Temperaturen nicht überstehen können, wie beispielsweise Pflanzen aus einem Hochgebirge.

Späte Frostereignisse können außerdem aufgrund der globalen Erwärmung zukünftig größere Probleme bereiten. Durch die höheren Temperaturen beginnen die Pflanzen sich früher zu entwickeln. Bei fortgeschrittener Entwicklung jedoch ist die Gefahr der Schädigung durch ein Frostereignis besonders groß.

Auch ist ein späterer Wintereinbruch nicht gerade optimal für die Pflanzen. Der Beginn der Winterruhe der Pflanze orientiert sich an der Temperatur und der Dauer der Dunkelheit. Wenn es aber aufgrund der globalen Erwärmung lange nicht zu niedrigen Temperaturen kommt, beginnt für die Pflanzen der Winter noch nicht und sie erzeugen weiterhin neue Blüten (Kröning, 2015).

Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um eventuelle Schäden verhindern zu können.

# Literaturverzeichnis

- Bayerischer Rundfunk (2016): Klimawandel in Bayern "Längst bei uns angekommen".  
URL:<http://www.br.de/klimawandel/klimawandel-bayern-folgen-erwaermung-100.html>  
(besucht am 21.03.2016).
- Deutsche Presse-Agentur (2015): Klimawandel kann Bayern dramatisch treffen. URL:  
<http://www.nordbayern.de/region/klimawandel-kann-bayern-dramatisch-treffen-1.4826589>  
(besucht am 21.03.2016).
- Foken, Thomas (2003): Angewandte Meteorologie. 1. Auflage. Springer, Berlin, 289 S.
- IPCC, Bundesumweltministerium, Bundesforschungsministerium und Umweltbundesamt (2013):  
Kernbotschaften des fünften Sachstandsberichts des IPCC, 5 S.
- Kiehl, J. T. und Trenberth, Kevin E. (1997): Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* **78** (2), 197–208
- Kiehl, J. T., Trenberth, Kevin E. und Fasullo, John T. (2009): Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* **90** (3), 311–324
- Kröning, Anna (2015): Gestresste Pflanzen stellen sich auf Frühling ein. URL:  
<http://www.welt.de/wissenschaft/article148704579/Gestresste-Pflanzen-stellen-sich-auf-Fruehling-ein.html> (besucht am 21.03.2016).
- Larcher, Walter (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. 5. Auflage, Ulmer, Stuttgart, 394 S.
- Lüers, J., Soldner, M., Olesch, J. und Foken, T. (2014): 160 Jahre Bayreuther Klimazeitreihe - Homogenisierung der Bayreuther Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie, ISSN 1614-8916, 56, 53 S.
- R Development Core Team: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Wien. URL: <http://www.r-project.org/>
- Rohde, Robert A: Global Warming Art. URL:  
[http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Climate\\_Change\\_Attribution\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Climate_Change_Attribution_png) (besucht am 21.03.2016).
- Root, Terry L., MacMynowski, Dena P., Mastrandrea, Michael D. und Schneider, Stephen H. (2005): Human-modified temperatures induce species changes: Joint attribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **102** (21), 7465–7469
- Schlegelmilch, Marius (2013): Wie entsteht Bodenfrost? URL:  
<http://www.wetter24.de/news/detail/2013-09-27-wie-entsteht-bodenfrost> (besucht am 21.03.2016).
- Schopfer, Peter und Brennicke, Axel (2006): Pflanzenphysiologie. Elsevier, München, 702 S.
- Schwartz, Mark D., Ahas, Rein und Aasa, Anto (2006): Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* **12**, 343–351
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. und Miller, H. L. (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 996 S.
- Theodor Friedrichs & Co.: Aspirations-Psychrometer nach Assmann. URL: <http://www.th-friedrichs.de/produkte/feuchte/relative-luftfeuchte-psychrometer/aspirations-psychrometer-nach-assmann> (besucht am 27.03.2016)
- Trudgill, D. L., Honek, A., Li, D. und van Straalen, N. M. (2005): Thermal time – concepts and utility. *Annals of Applied Biology* **146** (1), 1–14
- Union of Concerned Scientists (2005): Early Warning Signs: Spring Comes Earlier. URL:  
[http://www.ucsusa.org/global\\_warming/science\\_and\\_impacts/impacts/early-warning-signs-of-global-10.html](http://www.ucsusa.org/global_warming/science_and_impacts/impacts/early-warning-signs-of-global-10.html) (besucht am 27.03.2016)
- Vaisala (2006): User Guide "Vaisala HUMICAP Humidity and Temperature Probes HMP45A/D", Helsinki, Finnland. URL: [http://www.fondriest.com/pdf/vaisala\\_hmp45a\\_spec.pdf](http://www.fondriest.com/pdf/vaisala_hmp45a_spec.pdf) (besucht am 27.03.2016)



# Anhang

## Weitere Grafiken zu Kapitel 3

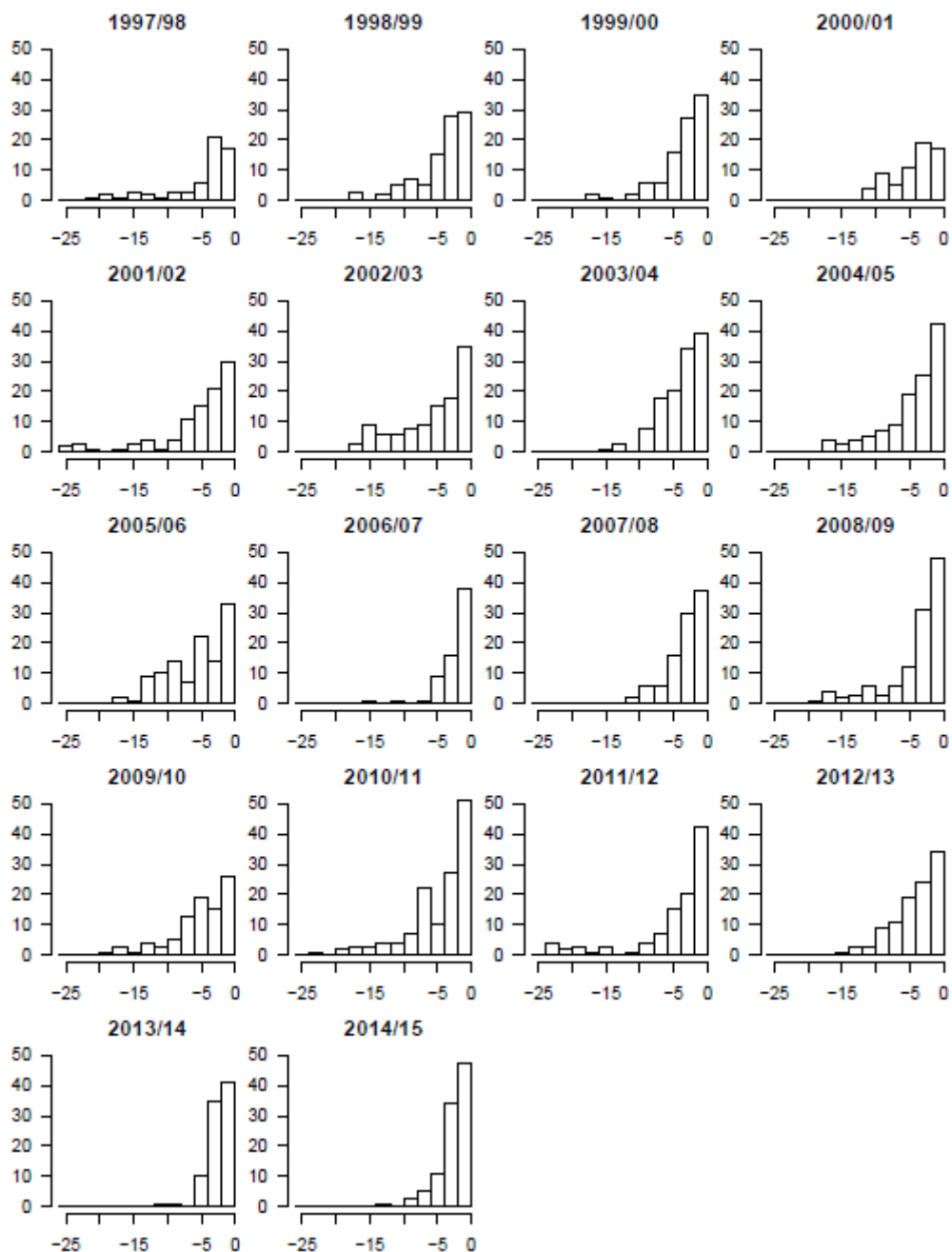


Abbildung 15: Verteilung der Frosttemperaturen in 2m Höhe. Für das Jahr 1997/1998 standen nur Daten ab Mitte Januar zur Verfügung.

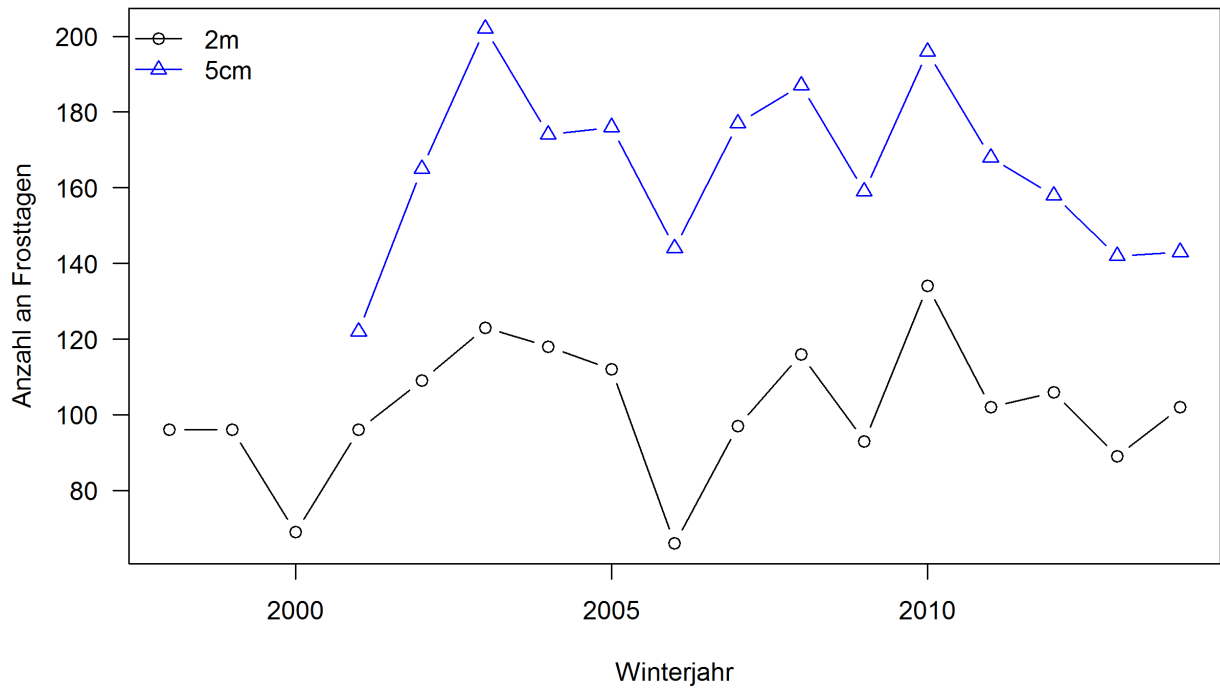


Abbildung 16: Anzahl an Frosttagen je Winterjahr insgesamt

# Danksagung

Die Anfertigung der Bachelorarbeit ist ein wesentlicher Schritt hin zur Befähigung zu eigenständiger wissenschaftlicher Arbeit und beschließt den ersten Teil der akademischen Ausbildung.

An erster Stelle möchte ich hier Prof. Dr. Christoph Thomas für die schnelle Bereitstellung des Themas und die Ermöglichung der Bachelorarbeit sowie etliche Hilfestellungen und Anregungen danken.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Dr. Wolfgang Babel für die intensive Betreuung während der Arbeitsphase, für die Unterstützung bei den notwendigen Skripts für die Untersuchung der Daten und für die Beantwortung diverser Fragen zur Arbeit.

Ebenfalls danken möchte ich meinen Eltern, namentlich Gerhard Wagner und Cornelia Boll, für die moralische Unterstützung und den Rückhalt während des gesamten Studiums.

Außerdem danken möchte ich der Universität Bayreuth für das Angebot dieses Studiengangs und für die Unterstützung beim Erreichen einer akademischen Ausbildung.

Abschließend möchte ich mich noch bei den Verantwortlichen für die Wetterstation sowie für die Bereitstellung der Messdaten bedanken, namentlich Prof. Dr. Christoph Thomas, Dr. Wolfgang Babel, Dr. Johannes Lüers, Prof. Dr. Thomas Föken und Johannes Olesch.

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Nicolas Wagner, Matrikelnummer 1229068, diese vorliegende Bachelorarbeit

## **Veränderung der Frostdynamik an der Wetterstation des Ökologisch Botanischen Garten der Universität Bayreuth**

selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt zu haben. Ich habe dabei nur die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die aus den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen wurden als solche kenntlich gemacht.

Diese Bachelorarbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ich bin mir des Weiteren bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben kann.

Bayreuth, den 30.03.2016

.....

Nicolas Wagner