



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Evaluierung von Dürreindizes im Marchfeld und im Eferdinger Becken – im Zeitraum von 1971 bis 2012 – anhand von Ernteanomalien“

verfasst von / submitted by

Mag. Johannes Laimighofer

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Master of Science (MSc)

Wien, 2016 / Vienna 2016

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

A 066855

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Geographie

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Schöner

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Dr. Franz Holawe



Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, 05.07.2016

A handwritten signature in blue ink, consisting of the letters 'ku' followed by a stylized 'J' or 'H'.

## Abstract

Dürreereignisse können in vielfältiger Weise auftreten. Man differenziert deswegen zwischen meteorologischen, hydrologischen, landwirtschaftlichen und sozio-ökonomischen Dürreereignissen. Dürreereignisse sind von vielfältigen Faktoren abhängig, wie bodenphysikalischen Parametern, klimatologischen, geologischen Gegebenheiten oder der infrastrukturellen Situation. Um diese verschiedenen Einflüsse zu vereinfachen und quantifizieren, wurden Dürreindizes entwickelt. Anhand zweier Indizes – der nur auf Niederschlag basierende SPI, sowie der anhand der klimatischen Wasserbilanz berechnete SPEI – werden Ernteanomalien verschiedener Feldfrüchte im Marchfeld und im Eferdinger Becken im Zeitraum von 1971 - 2012 untersucht. Außerdem werden unterschiedliche Berechnungsmethoden für die Evapotranspiration – das Thornthwaite und das Hargreaves Modell – und deren Einfluss auf den SPEI getestet. Trends und Übereinstimmungen der beiden Dürreindizes in den beiden Untersuchungsgebieten werden mittels des Mann-Kendall-Tests, des Chi-Quadrat-Tests, sowie des ROC getestet. Die Ernteerträge werden mittels einer Polynomfunktion modelliert und deren Abweichungen berechnet. Der SPI lässt einen negativen Trend im Marchfeld erkennen, währenddessen der SPEI einen positiven Trend in beiden Untersuchungsgebieten zeigt. Außerdem reagiert der SPEI sensitiv auf die unterschiedliche Berechnung der Evapotranspiration. Differenzen von über 200mm im Jahr konnten festgestellt werden. Der 3-monatige SPI und SPEI eignen sich am besten für die Modellierung der Ernteanomalien, wobei nur eine Varianz von bis zu 0,5 erklärt werden kann. Werden die Dürreindizes und die Ernteanomalien binär codiert, erhält man einen AUC-Wert von 0,85 für die Sommergerste im Marchfeld.

## Abstract

Drought periods can occur in manifold ways. Hence, there are four different categories of droughts: meteorological, hydrological, agricultural and socio-economic droughts. Drought events are dependent on multiple factors, such as soil-physical parameters, climatological and geological circumstances or the infrastructural situation. In order to quantify and simplify these influences, drought indices were invented. Two indices are used to model crop yield anomalies in the Marchfeld and the Eferdinger Basin from 1971 to 2012: the SPI, which is based on precipitation only, and the SPEI, which is calculated by the climatic water balance. Additionally, different methods for calculating the evapotranspiration are taken into account – the Thornthwaite and the Hargreaves Model. The aim is to test the sensitivity of the SPEI to the different models. The trends and conformities between the two drought indices and the study fields are analysed by means of the Mann-Kendall-Trend-Test, the Chi-Square-Test and the ROC. The crop yields will be modelled with a 2<sup>nd</sup> or 3<sup>rd</sup> degree polynomial function and their deviations will be calculated. Whereas the SPI shows a negative trend in the Marchfeld, the SPEI shows a positive trend in both research areas. Furthermore, the SPEI is sensitive to the different evapotranspiration models. There are annual differences of up to 200mm. The three-month SPI and SPEI are most suitable to model the crop yield anomalies, as they are describing the variances up to 50%. In case the drought indices and crop yield anomalies are binary coded, an AUC value of 0.85 is measured for the spring barley in the Marchfeld.

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	2
2. Forschungsfragen und Hypothesen .....	4
3. Untersuchungsgebiete und Daten.....	5
3.1. Daten.....	5
3.2. Die Untersuchungsgebiete - Das Marchfeld und das Eferdinger Becken .....	8
3.2.1. Klima der Untersuchungsgebiete .....	9
3.2.2. Hydrologie der Untersuchungsgebiete.....	11
3.2.3. Boden und Agrarwirtschaft der Untersuchungsgebiete .....	11
4. Methoden.....	12
4.1. Deskriptive Statistik – Hypothesentests .....	12
4.2. Der Standardized Precipitation Index (SPI) .....	14
4.3. Der Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) .....	19
4.4. Evapotranspiration.....	22
4.4.1. PET nach Thornthwaite .....	23
4.4.2. PET nach Hargreaves.....	25
4.5. Berechnung der Ernteerträge .....	28
5. Ergebnisse .....	29
5.1. Ergebnisse des SPI im Marchfeld und im Eferdinger Becken .....	29
5.3. Ergebnisse der potentiellen Evapotranspiration .....	35
im Marchfeld und im Eferdinger Becken .....	35
5.3.1. Berechnungen der PET nach Thornthwaite .....	35
5.3.2. Berechnungen der PET für Groß-Enzersdorf nach Hargreaves.....	38
5.3.3. Vergleich der unterschiedlichen PET-Modelle für Groß-Enzersdorf.....	39
5.4. Ergebnisse des SPEI im Marchfeld und im Eferdinger Becken .....	40
5.5. Vergleich der PET-Modelle im SPEI .....	43
5.6. Vergleich SPEI und SPI .....	44
5.7. Ergebnisse Erntemodell.....	50
5.8. Evaluierung der Dürreindizes anhand der Ernteanomalien.....	54
6. Diskussion der Ergebnisse .....	58
7. Ausblick .....	59
8. Abbildungsverzeichnis .....	61
9. Tabellenverzeichnis.....	63
10. Literaturverzeichnis.....	65

# 1. Einleitung

Hunger und zu wenig Trinkwasser ist eine millionenfache Todesursache. Ausgelöst können Hungersnöte und Trinkwasserknappheit unter anderem als Folge von extremen Dürreperioden werden. Die Folgen für die davon betroffenen Bevölkerungen reichen von der Auslösung kriegerischer Auseinandersetzungen, damit einhergehenden Flüchtlingsströmen, bis hin zu erhöhter Mortalität. Neben diesen exemplarischen sozioökonomischen Faktoren bewirken Dürreperioden fehlendes Pflanzenwachstum, Ernterückgänge, Landdegradation, Waldbrände, bioklimatische Auswirkungen auf den Menschen oder steigende Bodenerosion. Aus diesem Grund beschäftigen sich heute eine Vielzahl von Wissenschaftsdisziplinen mit der Thematik der Dürre – wie beispielsweise Klimatologie, Ökologie, Agrarwissenschaft, Ökonomie und Soziologie. (Şenaut 2015)

Dürreereignisse treten in allen Regionen der Welt auf und charakterisieren sich grundsätzlich über ein Ausbleiben oder eine Reduktion von Niederschlag, welche in Abhängigkeit der Dauer, unterschiedliche Folgen für die Umwelt nach sich ziehen (Mishra und Singh 2010). Zu beachten ist dabei eine strenge Abgrenzung von Dürre zu ähnlichen Umweltphänomenen. Die semantische Unterscheidung von Dürreereignissen zu Hitzewellen und Aridität ist in populärwissenschaftlichen Artikeln nicht immer eindeutig. Dürren lassen sich im Gegensatz zu Aridität und Hitze weder über geographische noch über saisonale Charakteristika determinieren. (Lloyd-Hughes und Saunders 2002; Şenaut 2015)

Dürren sind Phänomene, die in vielfältiger Art auftreten können, sei dies als Ernteausfall in der Landwirtschaft, als Rückgang des Oberflächenabflusses oder als Trinkwassermangel für die Bevölkerung. Daraus folgt, dass bei unterschiedlicher zeitlicher Betrachtung von Dürren unterschiedliche Konsequenzen auftreten. Es wird zumeist zwischen vier Arten (Heim Jr 2002; Hao und Singh 2015; Mishra und Singh 2010) von Dürren unterschieden:

- Meteorologische Dürren: Diese definieren sich über das Ausbleiben von Niederschlag, beziehungsweise über geringere Niederschlagssummen als im langjährigen arithmetischen Mittel.
- Hydrologische Dürren: Hier spielen der Oberflächenabfluss und der unterirdische Abfluss eine Rolle; sind diese beiden zu gering, um eine bestimmte Wassernutzung aufrecht zu erhalten, spricht man von einer hydrologischen Dürre. Relevant ist dafür unter anderem die Geologie der Einzugsgebiete.
- Landwirtschaftliche Dürren: Zu geringe Bodenfeuchte und Ernteausfälle sind Anzeichen für landwirtschaftliche Dürren. Für diese sind eine Vielzahl von Aspekten wichtig: Niederschlag, Bodenfeuchte, Bodenbeschaffenheit, Temperatur etc. – sowie die von diesen Faktoren abhängige aktuelle Evapotranspiration
- Sozioökonomische Dürreereignisse: Diese treten auf, wenn die Versorgung einer Gesellschaft durch die Reduzierung des Wasserangebots nicht mehr gegeben ist.

Um Intensität, Häufigkeit, Beginn und Dauer von Dürren zu beobachten, wurden Dürreindizes entwickelt. Verschiedene Zeitskalen eignen sich dabei für unterschiedliche Fragestellungen. 200 mm Niederschlag im Monat sind unter Umständen ausreichend zur Beibehaltung des Grundwasserpegels in einer Region. Allerdings sind mindestens 500 mm Niederschlag nötig, um Weizen anzubauen (Şenaut 2015). Die Aufgabe eines Dürreindex ist es, die komplexen Faktoren, die eine Dürre ausmachen, wie klimatologische, hydrologische oder

landwirtschaftliche Aspekte, mittels eines Modells in einen kategorisierbaren Wert umzuwandeln (Hao und Singh 2015). Im letzten Jahrhundert wurden dazu über 100 Dürreindizes entwickelt (Mishra und Singh 2010). Aus diesem Grund werden die Ausführungen auf einige dieser Dürre anzeigenden Indikatoren reduziert. Im Rahmen dieser Arbeit werden nun einige oft verwendete Indikatoren dargestellt.

Einfachere, nur auf Niederschlag basierende Indizes sind beispielsweise der Standardized Precipitation Index (SPI) (Guttman 1998; McKee u. a. 1993), der Rainfall Anomaly Index (RAI) (Keyantash und Dracup 2002), der "Deciles" (Keyantash und Dracup 2002), der RI (siehe Byun und Wilhite 1999) oder der Effective Precipitation (EP) Index (Byun und Wilhite 1999). Hydrologische Dürren lassen sich mit dem PHDI (Guttman 1991) Palmer Hydrological Drought Index (PHDI), dem Standardized Runoff Index (SRI) (Shukla und Wood 2008) oder dem Surface Water Supply Index (SWSI) beschreiben (Keyantash und Dracup 2002). Ebenso gibt es komplexere Indizes wie der - zusätzlich auf qualitativen Expertenanalysen beruhende - US Drought Monitor (USDM) (Svoboda u. a. 2002), oder solche, die die Evapotranspiration inkludieren wie der Reconnaissance Drought Index (RDI) (Vangelis, Tigkas, und Tsakiris 2013; Tsakiris und Vangelis 2005) und der Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno 2010; Vicente-Serrano u. a. 2015; Beguería u. a. 2014).

Für landwirtschaftliche Dürren werden oft der Palmer Drought Severity Index (PDSI) (Palmer 1965; Alley 1984), oder der „Crop Moisture Index“ verwendet (Heim Jr 2002). Der PDSI wurde für die USA entwickelt und liefert die besten Ergebnisse für semi-aride Gebiete. In neueren Studien wurde versucht die Qualität des PDSI in anderen geographischen Regionen, anhand einer zusätzlichen Kalibrierung, zu verbessern. (Wells, Goddard, und Hayes 2004). Neuere Methoden wie die Benutzung von Fernerkundungsdaten zur Analyse von Dürreperioden werden ebenso immer wichtiger (Anderson u. a. 2011). Solche Methoden sind besonders in Regionen adäquat, in denen Klimadaten nicht - oder nur in einer geringen räumlichen Auflösung - vorhanden sind; des Weiteren auch bei zeitlicher Quantität und Qualität.

Analysen von Dürreindizes gehen aber über die Bestimmung von vergangenen Dürreperioden hinaus. Neben der Anwendung in Warnsystemen für ein rechtzeitiges Ergreifen von Gegenmaßnahmen (Blauhut, Gudmundsson, und Stahl 2015; Bachmair, Kohn, und Stahl 2015), werden Dürreindizes oftmals für Prognosen im Rahmen von Klimamodellierungen verwendet (Haslinger, Schöner, und Anders 2015). Deswegen ist eine Evaluierung von Dürreindizes nötig, um die Konsequenzen von sich verändernden Umweltbedingungen exakter bestimmen zu können. Eine dieser Konsequenzen ist eine Reduktion der Ernte. Verfügt die Pflanze über zu wenig Wasser, kann dies zu Trockenstress führen. Unter Trockenstress versucht die Pflanze die Diffundierung von Wasser an den Stomataöffnungen zu verhindern und hält diese vermehrt geschlossen. Dadurch sinkt der Gasaustausch mit der Atmosphäre und es kommt zu einer Reduzierung der Photosynthese der Pflanze. Hält das Wasserdefizit über einen längeren Zeitraum an, kann dies zum Absterben der Pflanze führen. Verschiedene Pflanzen sind unterschiedlich gut angepasst und können eine bessere Resistenz gegenüber Trockenstress besitzen (Rischbeck 2007; S. Thaler u. a. 2012). Doch es ist davon auszugehen, dass – bei ausbleibender Bewässerung – die Ernteerträge rückläufig sind. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich allein auf klimatologische Elemente und schließt boden- und pflanzenphysiologische Parameter aus.

Die Konsequenzen von Dürren auf die landwirtschaftliche Produktion wurden in Studien von Potop und Lesk untersucht (Potop 2011; Lesk, Rowhani, und Ramankutty 2016). Dabei wurden Ernteerträge in Moldawien (Potop 2011), Tschechien (Potop, Možný, und Soukup 2012), sowie die Getreideproduktion weltweit (Lesk, Rowhani, und Ramankutty 2016; Geng u. a. 2016) untersucht. Die Auswirkungen von Dürreereignissen sind ebenso von der Vulnerabilität der jeweiligen Agrarstrukturen abhängig (Lesk, Rowhani, und Ramankutty 2016). In dieser Arbeit steht der Zusammenhang zwischen Dürreperioden und Ernteaussfällen in Österreich im Fokus. In Österreich konzentriert sich die intensiv betriebene Landwirtschaft vor allem auf zwei Regionen – dem Marchfeld und dem Eferdinger Becken. Thaler u. a. (2012) untersuchten für das Marchfeld die Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf bestimmte Nutzpflanzen; allerdings ohne Bezug zu den Erträgen (S. Thaler u. a. 2012; Sabina Thaler u. a. 2016). Eine weitere über das Marchfeld durchgeführte Studie stammt von Eitzinger u. a. (2013), diese beschäftigte sich mit der Veränderung der Bodenwasserkapazität durch den erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre (Eitzinger u. a. 2013). Eine ähnliche Studie zu den allgemeinen Trends, bezüglich der Prognose von Ernteerträgen, existiert von Strauss u. a. (Strauss u. a. 2012). Wiewohl sehr viele Studien für das Marchfeld durchgeführt wurden, lassen sich - auch nach gründlicher Recherche - keine derartigen Untersuchungen über das Eferdinger Becken nachweisen. Für einzelne Gemeinden in Oberösterreich gibt es jedoch eine Untersuchung des Trockenstresses im Jahr 2012 (Vereinigung der Pflanzzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs und Gesellschaft für Pflanzenzüchtung 2013).

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Aufdeckung von Zusammenhängen zwischen Dürre und Erntemengen im Eferdinger Becken als auch im Marchfeld leisten. Um Klimaprognosen und deren Interpretation für die beiden Gebiete in Zukunft besser interpretieren zu können, soll der Zusammenhang zwischen Dürreperioden und Ernteerträgen analysiert werden. Im ersten Teil der Arbeit werden dafür die Dürreindizes SPI und SPEI für die beiden Untersuchungsgebiete berechnet. Für den SPEI ist darüber hinaus die Modellierung der Evapotranspiration nötig. Hierfür werden die Hargreaves (Hargreaves, George und Samani, Zohrab 1985) und die Thornthwaite (Thornthwaite 1948) Methoden angewendet. Anschließend werden die Ernteerträge modelliert, um negative Abweichungen der Ernteerträge mit den festgestellten Dürreperioden zu vergleichen. Im folgenden Kapitel werden die Forschungsfragen und Hypothesen dieser Masterarbeit vorgestellt.

## 2. Forschungsfragen und Hypothesen

Diese Arbeit basiert auf zwei zentralen Forschungsfragen, den dazugehörigen Hypothesen sowie mehreren daraus abgeleiteten detaillierteren Forschungsfragen, welche gesammelt in diesem Kapitel dargestellt werden. Im Fokus der Arbeit stehen landwirtschaftliche Dürreperioden im Marchfeld und im Eferdinger Becken. Als Untersuchungszeitraum wurden die Jahre 1971 bis 2012 gewählt. Die Dürreereignisse werden mithilfe des SPI und des SPEI berechnet.

*Forschungsfrage 1:* Sind landwirtschaftliche Dürreperioden im Marchfeld und im Eferdinger Becken von 1971 bis 2012 – welche durch die Dürreindizes SPI und SPEI eruiert werden – als Anomalien in den Ernteerträgen feststellbar?

H0 zu F1: Die landwirtschaftlichen Dürreperioden des Marchfelds und des Eferdinger Beckens - im Zeitraum von 1971 bis 2012 – welche anhand der Dürreindizes SPI und SPEI eruiert werden, sind nicht in den Ernteerträgen der beiden Regionen feststellbar!

Die folgenden Fragestellungen stehen in Bezug zur ersten Forschungsfrage:

- Wie ist eine Dürreperiode definiert?
- Was sind landwirtschaftliche Dürreperioden?
- Welche Kategorisierungen von Dürreperioden existieren?
- Existieren weitere Dürreindizes und wieso wurden der SPI und der SPEI zur Beantwortung der Fragestellung ausgewählt?
- Was sind die Vor- und Nachteile des SPI?
- Was sind die Vor- und Nachteile des SPEI?
- Bestehen hydrologische und klimatische Differenzen zwischen den beiden Untersuchungsgebieten?

Die zweite Forschungsfrage bezieht sich auf die Berechnung des SPEI. Da für dessen Berechnung die klimatische Wasserbilanz von Nöten ist (Wasserbilanz = Niederschlag – potentielle Evapotranspiration), werden zwei Modelle zur Kalkulation herangezogen. Dafür wurden die Modelle nach Thornthwaite und Hargreaves ausgewählt.

*Forschungsfrage 2:* Existieren Differenzen bei den Zeitreihen des SPEI im Marchfeld und im Eferdinger Becken durch die unterschiedliche Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach Hargreaves und Thornthwaite?

H0 zu F2: Es existieren keine Unterschiede bei den Zeitreihen des SPEI im Marchfeld und im Eferdinger Becken durch die unterschiedliche Berechnung der Evapotranspiration!

Wie bei Forschungsfrage 1 lassen sich auch hier wieder zusätzliche Fragestellungen deduzieren.

- Welche Modelle zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration gibt es?
- Was sind die Vor- und Nachteile des Evapotranspirations-Modells nach Hargreaves?
- Was sind die Vor- und Nachteile des Evapotranspirations-Modells nach Thornthwaite?

Auf diese Einführung in den Forschungsstand und die Forschungsfragen dieser Arbeit sollen im nächsten Kapitel die verwendeten Daten erklärt und die Untersuchungsgebiete vorgestellt werden.

## 3. Untersuchungsgebiete und Daten

### 3.1. Daten

Die Daten, welche für die Berechnung der Dürreindizes, sowie des Erntemodells benötigt werden, können zu einem Großteil online bezogen werden. Die Niederschlagswerte für das Eferdinger Becken und das Marchfeld können vom Hydrographischen Dienst heruntergeladen werden (<http://ehyd.gv.at/>). Die Temperaturzeitreihen wurden auf Anfrage vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Abteilung Umwelt- und Wasserwirtschaft,

sowie von der Zentralanstalt für Meteorologie (ZAMG) zur Verfügung gestellt. Die Niederschlagsdaten sind als tägliche Summe verfügbar. Direkt von der Website <http://ehyd.gv.at/> können die Niederschlagsdaten ab 1971 verwendet werden. Im Eferdinger Becken (siehe Tabelle 1) werden die Stationen Aschach, Eferding, Goldwörth und Ottensheim verwendet. Dies sind jene Stationen mit Niederschlagsdaten, die im Untersuchungsgebiet liegen. Die Zeitreihe der Station Eferding ist erst ab dem Jahr 1997 verfügbar, alle anderen ab dem Jahr 1971. Die monatliche Durchschnittstemperatur ist in Aschach und Goldwörth ab 1971 vorhanden, in Ottensheim ab 1983 und in Eferding ab 1996. Die Stationen liegen auf einer Höhe von 260 bis 292 Meter. Die Station Aschach wurde im Jahr 2002 umgesiedelt.

Station	täglicher Niederschlag	monatliche Durchschnittstemperatur	Höhe über Meeresniveau
Aschach	1971	1971	270, seit 2002 292
Eferding	1997	1996	274
Goldwörth	1971	1971	260
Ottensheim	1971	1983	265

*Tabelle 1 Längen der Zeitreihen der einzelnen Stationen im Eferdinger Becken.*

Im Marchfeld (siehe Tabelle 2) werden die Niederschlagszeitreihen der Stationen Baumgarten an der March, Eckartsau, Franzensdorf, Gänserndorf, Lasee, Leopoldsdorf, Markthof, Obersiebenbrunn, Orth an der Donau und Salmhof verwendet. Bei der monatlichen Durchschnittstemperatur sind von 1971 bis 1980 nur die Daten von Obersiebenbrunn vorhanden, erst ab 1990 sind die Daten der anderen Stationen verfügbar. Im Marchfeld wurde 2006 die Station Orth an der Donau umgesiedelt.

Station	täglicher Niederschlag	monatliche Durchschnittstemperatur	Höhe über Meeresniveau
Baumgarten an der March	1975		144
Eckartsau	1971		146
Franzensdorf	1979	1981	153
Gänserndorf	1971	1990	150
Lasee	1975		144
Leopoldsdorf	1977	1990	152
Markthof	1971		141
Obersiebenbrunn	1971 bis 2010	1971 bis 1980	151
Orth	1971	1990	146, seit 2006 148
Salmhof	1997	1996	144

*Tabelle 2 Länge der Zeitreihen der einzelnen Stationen im Marchfeld*

Für die Berechnung der Evapotranspiration nach Hargreaves sind tägliche Maximum- und Minimum-Temperaturdaten nötig. Das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft stellte tägliche Temperaturmesswerte von 7, 14 und 21 Uhr zur Verfügung. Diese sind für die Anwendung der Hargreaves-Methode aber unpassend, da – um auf die täglichen Maxima- und Minima-Daten zu kommen – eine zusätzliche Abschätzung der Temperaturdaten nötig wäre. Das Amt der niederösterreichischen Landesregierung verfügt zusätzlich über tatsächliche tägliche Maximum- und Minimum-Temperaturdaten. Diese sind aber auf die Stationen Franzensdorf, Gänserndorf und Leopoldsdorf beschränkt. Des Weiteren beginnt die Zeitreihe erst im Jahr 1990. Da für die Berechnung des SPEI ein Untersuchungszeitraum von mindestens

30 Jahren von Vorteil ist, werden diese Daten nicht verwendet. Für die Beantwortung der zweiten Forschungsfragen wird aus diesem Grund eine Zeitreihe von täglichen Maxima- und Minima-Temperaturdaten der Station Groß-Enzersdorf verwendet, die von der ZAMG bereitgestellt wurde. Für das Eferdinger Becken kann das Hargreaves-Modell somit nicht berechnet werden. Aus diesem Grund reduziert sich die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage auf den SPEI von Groß-Enzersdorf.

Wesentlich schwieriger gestaltete sich die Beschaffung von Ernteerträgen für die zwei Untersuchungsgebiete. Nachdem es nicht möglich war Daten von Dürreschäden über einen längeren Zeitraum als einem Jahr zu erhalten, wurden Ertragsdaten für die beiden Untersuchungsgebiete zusammengestellt. Dafür notwendig sind Daten über Ertrag und Anbaufläche für beide Regionen. Ansprechpartner war hierfür die Statistik Austria. Die Daten sind nur auf Bundesländerebene frei verfügbar. Auf Bezirksebene wurden die Daten für Gänserndorf, Eferding, Linz-Land und Urfahr-Umgebung zugekauft. Da die Ernteerträge auf Bezirksebene nicht für alle Jahre zwischen 1971 und 2012 zur Verfügung stehen, müssen die fehlenden Jahre über ein lineares Regressionsmodell geschätzt werden. Es handelt sich dabei um 45 verschiedene Kulturpflanzen, zusammengefasst aber nur um 25 (siehe Tabelle 3), da einige der angebauten Pflanzen in den letzten 42 Jahren wiederholt zu verschiedenen Klassen von Feldfrüchten zusammengefasst wurden. Um einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor zu vermeiden, werden jene Sorten, welche nicht über den gesamten Zeitraum vorliegen, ausgeschlossen.

Weizen	Spätkartoffeln	Wintergerste	Raps	Frühe Kartoffeln
Roggen	Vortreiberkartoffeln	Sommergerste	Mohn	Triticale
Wintergetreide	Zuckerrüben	Körnermais	Corn-Cob-Mix	Grünmais
Sommergetreide	Futtermüben	Körnererbsen	Sonnenblumen	Sojabohnen
Hafer	Silomais	Ackerbohnen	Klee	Egart

*Tabelle 3 die zur Verfügung stehende Daten über Ackerfrüchte auf Bundesländer und Bezirksebene*

Die Daten sind gegliedert in die Anbaufläche in Hektar und die absolute Produktion in Tonnen auf Bundesländerebene. Auf Bezirksebene sind die absolute Anbaufläche und die Produktion in dt/ha vorhanden. Berechnet werden die Datensamples für Tonne pro Hektar, für das Bundesland und die einzelnen Bezirke.

### 3.2. Die Untersuchungsgebiete - Das Marchfeld und das Eferdinger Becken

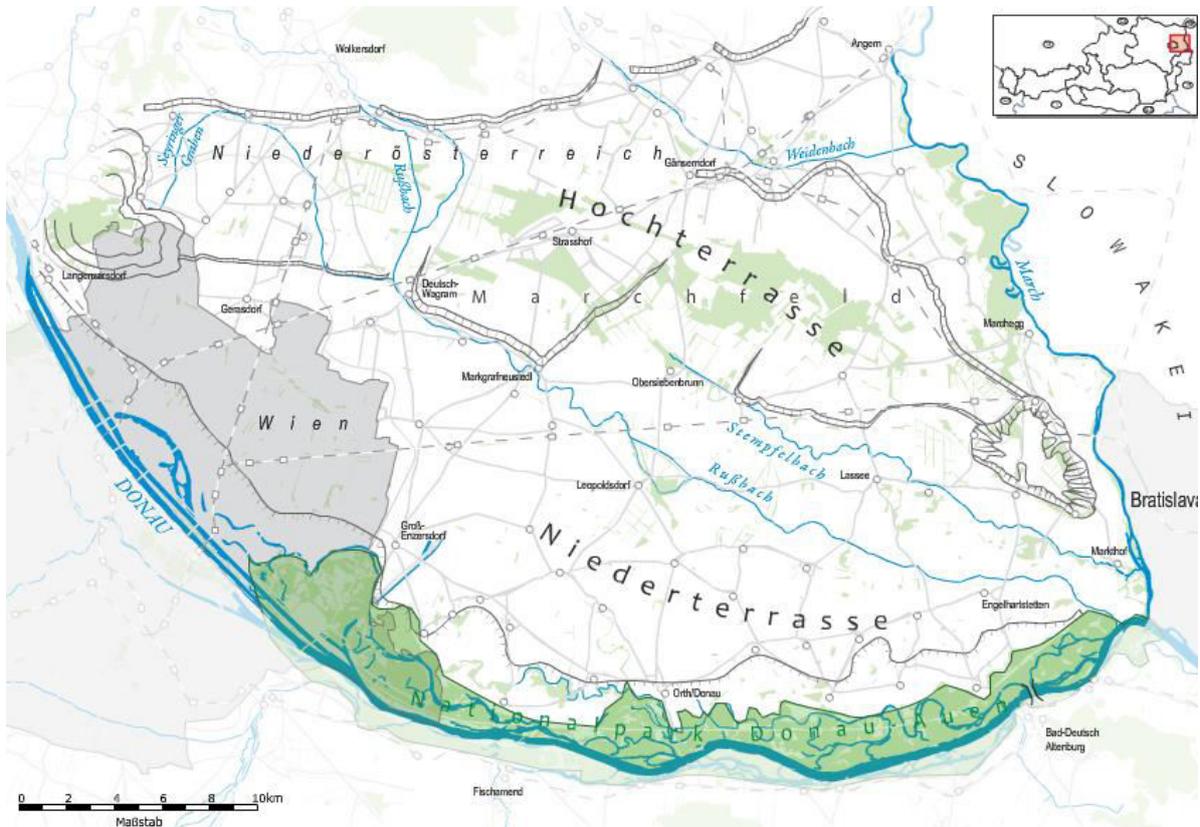


Abbildung 1 Karte des Marchfelds, Quelle: [www.marchfeldkanal.at](http://www.marchfeldkanal.at)

Die beiden Untersuchungsgebiete sind landwirtschaftlich intensiv genutzte Regionen in Österreich. Das Marchfeld, im Südosten von Österreich, hat eine Größe von ca. 900 km<sup>2</sup>, davon sind ca. 600 km<sup>2</sup> bewirtschaftet. Das Eferdinger Becken, neben dem Marchfeld die zweitwichtigste Gemüseanbauregion in Österreich, ist mit einer Größe von 120 km<sup>2</sup> im Vergleich bedeutend kleiner. Das Marchfeld liegt auf einer Seehöhe von 143 bis 178 m. Im Süden ist das Gebiet durch die Donau begrenzt, im Westen durch den Bisamberg, im Norden durch den Großen Wagram mit dem daran anschließenden Weinviertler Hügelland, sowie im Osten durch die March. Bei Letzterer handelt es sich allerdings nicht um eine geomorphologische, sondern um eine politische Grenze (siehe Abbildung 1) (Hadatsch und Götz 2000). Das Eferdinger Becken ist Teil von den Bezirken Eferding, Linz-Umgebung und Urfahr-Umgebung (siehe Abbildung 2). Nördlich der Donau liegt der Bezirk Urfahr-Umgebung, südlich hauptsächlich der Bezirk Eferding, mit einem kleinen Anteil von Linz-Umgebung im Osten. Das Eferdinger Becken liegt ca. auf einer Seehöhe von 270 m. Es ist eines von drei Beckenlandschaften und Siedlungsräumen an der oberösterreichischen Donau. Die Landschaft im Eferdinger Becken ist geprägt vom Auwaldbereich in der Nähe der Donau, der Austufe und des vor allem landwirtschaftlich geprägten Bereichs der Niederterrasse (<http://www.land-oberoesterreich.gv.at>).

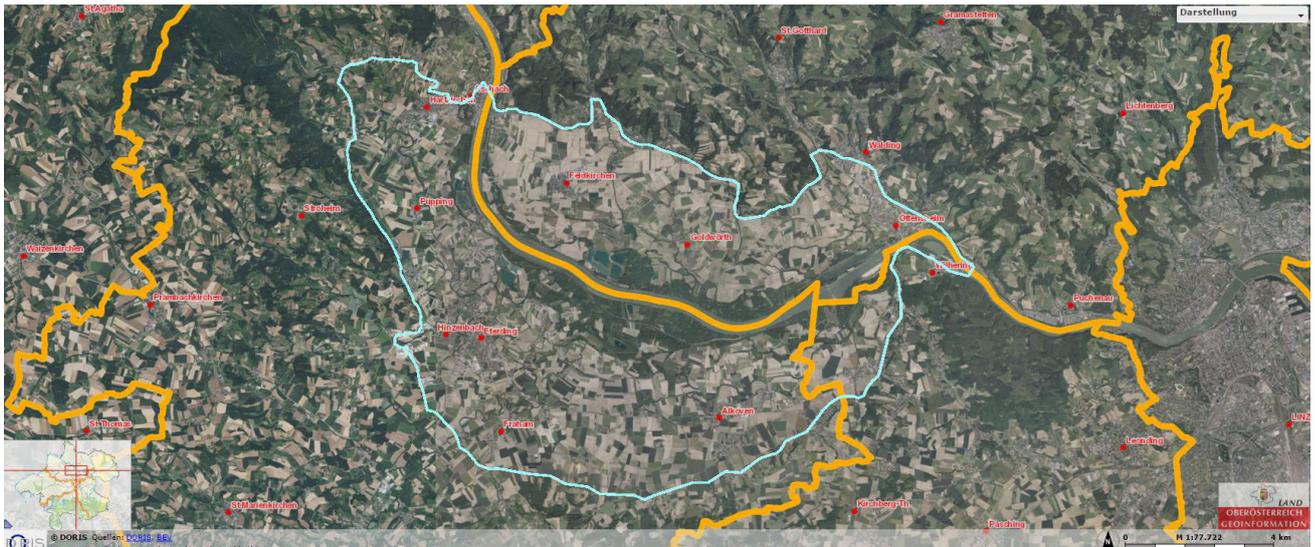


Abbildung 2 Darstellung des Eferdinger Beckens, Quelle: Doris - Land Oberösterreich

Für diese Arbeit ist eine klimatologische Einordnung der beiden Untersuchungsgebiete von Bedeutung. Das Klima in Österreich ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, zwei Aspekten wird dabei eine besondere Relevanz zugesprochen. Dies sind die geographische Lage Österreichs im atlantisch-pannonischen Übergangsbereich, sowie das Relief (Nagl 1983). Beide Untersuchungsgebiete sind Beckenlandschaften, welche sich im Tertiär bildeten und sind geprägt durch ihre Flussterrassen. In beiden Gebieten ist die Donau formgebend, im Eferdinger Becken zusätzlich noch der Innbach und der Aschbach (Fink u. a. 2000; Hadatsch und Götz 2000, <http://www.land-oberoesterreich.gv.at/>). Eine Reihe von Forschungsarbeiten versuchte das österreichische Klima in Kategorien zu erfassen. Häufig treten für diese Klassenzuweisung lediglich die Werte der Ozeanität und Kontinentalität auf, wobei das österreichische Klima durch seine variierenden morphologischen Gegebenheiten in eine Vielzahl von Kategorien differenziert werden muss (Nagl 1983). Ein Problem der Klassifikation sind die Werte, welche dafür verwendet werden sollen (Harlfinger und Knees 1999; Nagl 1983). Für diese Arbeit wird die Einteilung der Klimaräume in Österreich von Harlfinger und Knees verwendet, welche im folgenden Kapitel anhand der beiden Untersuchungsgebiete ausführlicher beschrieben wird.

### 3.2.1. Klima der Untersuchungsgebiete

In Österreich herrscht weitgehend ein warm bis kühl gemäßigtes Klima. Dies lässt sich auch anhand der beiden Walter-Lieth-Diagramme (siehe Abbildung 3) zeigen, die für beide Untersuchungsgebiete ein humides Klima beschreiben. Nach der Einteilung der Klimaräume in Österreich durch Harlfinger und Knees liegt das Eferdinger Becken im nordalpinen Bereich und das Marchfeld im Pannonikum (Harlfinger und Knees 1999). Der nordalpine Bereich ist gegen Osten hin von einer abnehmenden Ozeanität geprägt. Der Niederschlag ist von der Höhenlage und der Entfernung zum Gebirge bestimmt. Erwartet werden in Österreich jährliche Niederschlagsmengen von 1000 bis 2000 mm, im niedrig gelegeneren Alpenvorland können sie im Bereich um 800 mm liegen (Harlfinger und Knees 1999). Dies bestätigt auch das Gebietsmittel aus allen vier Stationen im Eferdinger Becken. Der durchschnittliche Niederschlag über den gesamten Untersuchungszeitrahmen liegt hier bei 808 mm.

Im Gegensatz dazu ist das Pannonikum von sehr niedrigen jährlichen Niederschlagssummen von 500 bis 600 mm geprägt. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme im Marchfeld liegt bei 546 mm. Darüber hinaus sind hohe Windgeschwindigkeiten und hohe Sommertemperaturen aufgrund der verstärkten Kontinentalität zu beobachten (Harlfinger und Knees 1999; Rischbeck 2007; S. Thaler u. a. 2012; Sabina Thaler u. a. 2016).

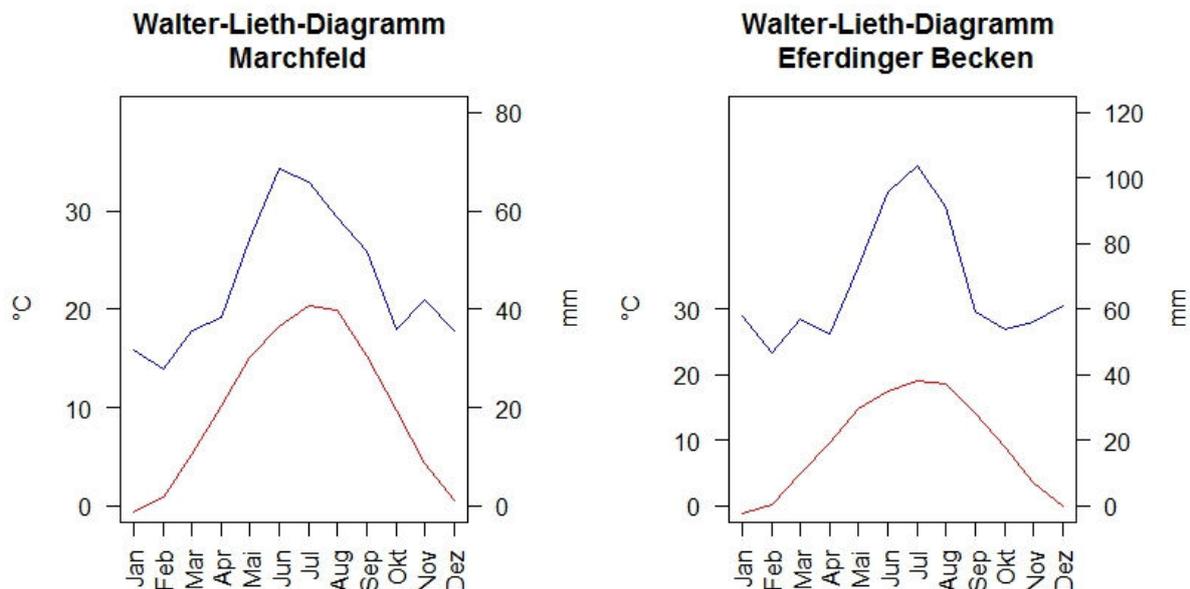


Abbildung 3 die beiden Grafiken zeigen Walter-Lieth-Diagramme für das Marchfeld und das Eferdinger Becken. Für beide Gebiete wurde ein arithmetisches Mittel der einzelnen Stationen berechnet - für Temperatur und Niederschlag - welche in den beiden Grafiken abgebildet sind. Der Untersuchungszeitraum ist 1971 bis 2012.

Die jährliche Durchschnittstemperatur im Untersuchungszeitraum liegt im Marchfeld bei 9,9°C und im Eferdinger Becken bei 9,1°C (nach eigener Berechnung). Harlfinger und Knees beschreiben für das Pannonikum und den nordalpinen Raum für den Zeitraum von 1961-1990 um 0,3°C niedrigere Temperaturen. Für die Vegetation ist die durchschnittliche Temperatur um 14 Uhr während der Vegetationsperiode wichtig. Diese ist in beiden Untersuchungsgebieten höher als im Großteil des restlichen Österreichs und liegt knapp über 20°C. Daraus lassen sich unter anderem die guten Bedingungen für die Landwirtschaft ableiten (Harlfinger und Knees 1999). Die Wintertemperatur (nach Harlfinger und Knees der Durchschnitt der Monate Dezember, Jänner und Februar) beträgt im Marchfeld 0,25°C, im Eferdinger Becken -0,33°C (eigene Berechnung). Beide Werte sind erneut um ca. 0,3°C höher als die von Harlfinger und Knees in der Literatur angegebenen. Dies lässt sich auf zwei mögliche Faktoren zurückführen. Einerseits auf mikroklimatische Umstände, andererseits auf die anthropogene Klimaerwärmung (die Untersuchung von Harlfinger und Knees stammt aus dem Jahr 1999). Ein weiterer Wert zur Einordnung der beiden Gebiete ist die Dauer der Vegetationszeit. Diese liegt im Pannonikum bei durchschnittlich 251 Tagen und im nordalpinen Bereich bei 239 Tagen (Harlfinger und Knees 1999). Harlfinger und Knees verwenden für ihre Klimaklassifikation des Weiteren die Anzahl der Niederschlagstage. Diese sind definiert mit Niederschlag > 1mm/ Tag. Im Pannonikum ist im Mittel mit 49 Niederschlagstagen zu rechnen, im nordalpinen Bereich mit 69 Tagen.

### 3.2.2. Hydrologie der Untersuchungsgebiete

Im Marchfeld wird das Grundwasser in den quartären Schotterkörpern gespeichert und fließt dort von Nordwesten nach Südosten. Die quartären Schotter haben eine Mächtigkeit von ca. 10 m, währenddessen die tertiären Schotter – in der Lasseer Wanne, Glinzendorfer Wanne und Aderklaaer Wanne – eine Mächtigkeit von 30 bis 80 m besitzen. Der Grundwasserspiegel liegt ca. 5 bis 10 m unter der Geländeoberkante. Die Grundwasserneubildung erfolgt vor allem im Frühjahr und Winter, da die Niederschläge im Sommer von der Verdunstung und von den Pflanzen aufgebraucht werden. Im Eferdinger Becken kann die Mächtigkeit des Grundwasserkörpers bis zu 11 m betragen.

Beide Grundwasserkörper der Untersuchungsgebiete werden für die Wasserversorgung verwendet. Im Eferdinger Becken werden ca. 65% für die Nutzwasserversorgung genutzt, 30% für die zentrale Wasserversorgung und 4-5% werden für die landwirtschaftliche Bewässerung gebraucht (Loidl 2007, S.23). Die Wasserversorgungsanlage in Goldwörth stellt zusätzlich das Trinkwasser für den Linzer Großraum bereit (<http://www.land-oberoesterreich.gv.at/>).

### 3.2.3. Boden und Agrarwirtschaft der Untersuchungsgebiete

Im Marchfeld lassen sich ca. 255 unterschiedliche Bodenarten nachweisen (Sabina Thaler u. a. 2016). Die Haupttypen sind Schwarzerden mit Lößvorkommen in den höheren Bereichen der Praterterrasse; Kalkhaltige und kalklose Tschernoseme in der Gänserndorfer Platte; Feuchtschwarzerden, anmoorige Böden und Gleyböden in der Lasseer Wanne und der Siebenbrunner Bucht; Kolluvien und Sand- und Schotterböden am Ruß- und Stempfelbach. Aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten ist im Marchfeld die Winderosion ein beträchtliches Problem. Es kommt zu Humusabtragung, welche durch die intensive Landwirtschaft verstärkt wird (Hadatsch und Götz 2000; Rischbeck 2007). Im Eferdinger Becken hingegen handelt es sich um graue Auböden, braune Auböden und verbrauchte kalkhaltige graue Auböden. Diese befinden sich vor allem in der Austufe. Der kalkhaltige graue Auboden wird in erster Linie landwirtschaftlich genutzt. In der Region der Niederterrasse sind Lockersedimente vorherrschend sowie Braunerdeböden, die einen hochwertigen Ackerboden darstellen (<http://www.land-oberoesterreich.gv.at/>).

Die Landwirtschaft im Marchfeld ist dominiert von Ackerbau. Rund 81% der landwirtschaftlichen Betriebe verfügen über Ackerflächen, dies liegt weit über den Werten für Niederösterreich und Österreich (66% und 16%). Grünflächen und Wälder sind dementsprechend unterrepräsentiert. Es dominieren der Gemüseanbau, sowie der Anbau von Getreide. Die meisten Gemüsesorten müssen bewässert werden, da die Niederschlagssumme in der Vegetationszeit zu gering ist (Hadatsch und Götz 2000). Im Eferdinger Becken werden 92% der landwirtschaftlichen Fläche für den Ackerbau genutzt. Während im Süden der Gemüsebau vorherrscht, wird im Norden vermehrt Getreide gepflanzt (<http://www.land-oberoesterreich.gv.at/>).

## 4. Methoden

### 4.1. Deskriptive Statistik – Hypothesentests

Um eine erste Analyse der Daten (die Anwendung erfolgte teilweise bereits in der Beschreibung der Untersuchungsgebiete), welche die Grundlage für diese Arbeit bilden, durchzuführen, werden einige statistische Tests benötigt, die Teil der deskriptiven Statistik sind. Die Auswahl der Daten erfolgte aufgrund der allgemeinen Datenverfügbarkeit, demnach handelt es sich nicht um eine zufällige Stichprobe. Teile der deskriptiven Statistik sind die Berechnung des arithmetischen Mittels, des Medians, der Quantile, der Varianz und von Minimum- und Maximum-Werten. Die Auswertung erfolgt in R (R Core Team 2015) mittels der Funktionen „summary“, „describe“ und „hist“, die Darstellung in tabellarischer oder graphischer Form. Ein wichtiger Bestandteil ist die empirische Häufigkeitsverteilung, da hier bereits Tendenzen für die Anpassung der kumulierten Häufigkeiten an theoretische Verteilungen abgelesen werden können. (vgl. Schönwiese 2013b, S.43ff)

Außerdem werden in der Arbeit verschiedene Korrelationsmaße verwendet. Hier sei darauf verwiesen, dass viele der Daten nicht normalverteilt sind, weswegen der Pearson-Korrelationskoeffizient nicht verwendet werden kann, wie zum Beispiel bei der Regressionsschätzung der Ernteerträge. In den anderen Fällen werden verteilungsunabhängige Korrelationskoeffizienten – Rangkorrelationskoeffizienten – verwendet (Schönwiese 2013b). Einerseits wird die Spearman-Rangkorrelation (siehe Formel ( 1 )) verwendet (z.B.: Haslinger u. a. 2014; Bachmair, Kohn, und Stahl 2015). Hier werden den Daten Ränge zugeordnet und anschließend wird die Korrelation der Ränge berechnet:

$$r_R = 1 - \frac{6 \sum D_i^2}{n^3 - n} \quad (1)$$

Wobei  $n$  die Anzahl der Paare und  $D_i$  die Differenz zwischen den einzelnen Rängen der beiden Stichproben darstellt. Andererseits wird der Korrelationskoeffizient nach Kendall (siehe Formel ( 2 )) angewandt (Schönwiese 2013b, S.191):

$$r_K = \frac{2 (KO - DI)}{n (n - 1)} \quad (2)$$

Die Kendall-Korrelation beruht auf den Bindungen und dem Vergleich von Folgepaaren in der Zeitreihe und vergleicht deren Konkordanzen ( $KO$ ) und Diskonkordanzen ( $DI$ ) der Stichprobenwertepaare. (Schönwiese 2013b, S.188ff)

Eine weitere Untersuchung erfolgt mit der Kontingenztafel und dem Chi-Quadrat-Test. Für den Vergleich des SPI und des SPEI zwischen den Untersuchungsgebieten und für den Zusammenhang zwischen Ernteerträgen und Dürreperioden werden die jeweiligen Ergebnisse binär codiert. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse mittels einer Kontingenztafel dargestellt und der Vierfeldertest durchgeführt. Eine Kontingenztafel ist exemplarisch in Tabelle 4 dargestellt. Die Berechnung des Chi-Quadrat-Vierfeldertests ist nach Schönwiese 2013b in Formel ( 3 ) definiert.

$$\hat{\chi}^2 = \frac{n (AD - BC)^2}{(A + B) * (C + D) * (A + C) * (B + D)} \quad (3)$$

Ausprägung A	Ausprägung B	
	0	1
0	A	B
1	C	D

Tabelle 4 Beispiel einer Kontingenztafel. A, B, C und D sind hierbei die Anzahl der gemeinsamen Ausprägungen. Demnach steht A dafür wenn Ausprägung A und B gleichzeitig den Wert 0 besitzen, usw.

Da der Chi-Quadrat-Test nur bedingt als Maß für den Zusammenhang zwischen zwei Variablen verwendet werden kann (Schönwiese 2013b), wird für die Kontingenztafeln eine zusätzliche Methode herangezogen. Mittels der ROC (Receiving Operating Characteristics) soll festgestellt werden, ob sich die Dürreereignisse zwischen den Untersuchungsgebieten unterscheiden, beziehungsweise wie oft Dürren prognostiziert wurden, welche keine Ernteschäden auswiesen (Fawcett 2006; Mason und Graham 2002). Die ROC beschreibt wie häufig Dürreereignisse der beiden Indizes übereinstimmen, oder nicht übereinstimmen. Beziehungswise wie oft Ernteanomalien eintreten, wenn die Dürreindizes Dürreereignisse anzeigen oder nicht. Als Maß wird hierfür die Area Under the Curve (AUC) verwendet. Ein graphisches Beispiel ist in Abbildung 4 dargestellt. Die errechneten Werte AUC liegen zwischen 0 und 1. Bei 0,5 ist der Zusammenhang zwischen den zwei Variablen zufällig, bei 1 werden alle Ereignisse, beziehungsweise Nicht-Ereignisse, richtig prognostiziert.

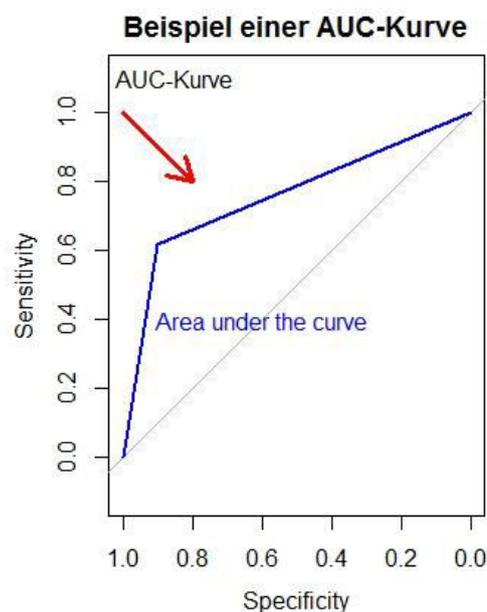


Abbildung 4 Beispiel einer AUC-Kurve, hier wird der 12-monatige SPI mit dem 12-monatigen SPEI im Marchfeld verglichen.

Da hydrologische und meteorologische Daten selten normalverteilt sind, werden bei der Testung von Hypothesen geeignete Methoden herangezogen. Da die Daten des SPEI und des SPI standardisiert und normalverteilt sind, kann der t-Test angewandt werden. Bei nicht-normalverteilten Daten kann der Mann-Kendall-Trend-Test verwendet werden. Der Mann-

Kendall-Test hat den Vorteil, dass eine bestimmte Verteilung der Daten keine Voraussetzung ist. Die Mann-Kendall-Statistik  $S$  wird mittels Formel ( 4 ) berechnet (Asadi Zarch, Sivakumar, und Sharma 2015):

$$S = \left( \frac{4p}{(N(N-1))} \right) - 1 \quad (4)$$

Der Erwartungswert von  $S$  ist  $E(S) = 0$  und die Varianz ist in Formel ( 5 ) gegeben:

$$Var(S) = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)} \quad (5)$$

Einen positiven Trend erkennt man bei einem Signifikanzlevel von 95% bei einem Z-Wert  $> 1,96$  (für die Berechnung siehe Formel ( 6 )), da der Test bei einer Stichprobengröße  $> 10$  die Normalverteilung approximiert (Asadi Zarch, Sivakumar, und Sharma 2015).

$$Z = \frac{S}{(Var(S))^{1/2}} \quad (6)$$

In der vorliegenden Arbeit wird der Mann-Kendall-Test zur Analyse von Zeitreihen und deren Trends verwendet. Zusätzlich wurden die Zeitreihen des Niederschlags und der Temperatur auf Inhomogenitäten getestet. Inhomogenitäten in Temperatur- oder Niederschlagszeitreihen sind Sprünge in den Zeitreihen, die zum Beispiel auf verfälschte Messungen oder Änderungen der Stationsumgebungen hervorgerufen werden können (Auer u. a. 2007). Als Test wurde hierfür der Homogenitätstest nach Buishand verwendet. Es konnten bei keiner Zeitreihe – Niederschlag und Temperaturzeitreihen aller Stationen beider Untersuchungsgebiete – signifikante Brüche festgestellt werden. Dafür wurde die Funktion „BHRtest“ aus dem R-Package „iki.dataclim“ verwendet.

## 4.2. Der Standardized Precipitation Index (SPI)

Der SPI wurde im Jahr 1993 von McKee et al. vorgestellt. Dürre wird darin in Beziehung zu akkumulierten Niederschlagssummen unterschiedlich langer Zeitfenster gesetzt. Das akkumulierte Defizit des Niederschlags wirkt sich aber erst über unterschiedlich lange Zeiträume auf verschiedene Wasserressourcen aus. Parameter, wie die Bodenfeuchte, das Grundwasser, der Abfluss oder der Wasserspeicher, sind somit nicht immer im selben Ausmaß von einem Niederschlagsdefizit betroffen (McKee u. a. 1993). Aus diesem Grund werden mit Hilfe des SPI die Dürreereignisse anhand verschiedener Zeitskalen untersucht. Somit ist es mittels des SPI möglich viele verschiedene Arten von Dürren zu untersuchen, wie beispielsweise hydrologische Dürren (Haslinger u. a. 2014).

Betrachtet man landwirtschaftliche Dürren, dann spielen weitere Faktoren wie der Boden oder die Ackerfrucht eine Rolle (Stenitzer und Hösch 2004; Sabina Thaler u. a. 2016). Für diese eignet sich der SPI mit Zeitfenstern von bis zu drei Monaten. Im Falle hydrologischer Dürren liefern längere Aggregationsniveaus des SPI die beste Übereinstimmung (McKee u. a. 1993). In einer in Ungarn durchgeführten Studie besitzt der SPI die höchste Korrelation mit

landwirtschaftlichen Dürren, wenn Skalen von 2-3 Monaten betrachtet werden (Mishra und Singh 2010). Der SPI zeigt sich im Vergleich mit dem PDSI – welcher aufgrund der vielen notwendigen Daten schwieriger zu berechnen ist – genauso aussagekräftig für landwirtschaftliche Dürreperioden (Lloyd-Hughes und Saunders 2002; Hayes u. a. 1999). Beide Indizes haben den Vorteil der Standardisierung, allerdings ist der SPI in der Kalkulation und der Datenbeschaffung leichter zu handhaben, weswegen für diese Arbeit der SPI ausgewählt wurde. Ein weiterer Vorteil des SPI besteht in seiner Uniformität. Aufgrund seiner Normalverteilung lassen sich neben Dürreereignissen auch Phasen mit überdurchschnittlichen Niederschlagssummen erkennen (McKee u. a. 1993). Die Möglichkeit damit Trockenheit in unterschiedlichen Zeitskalen auf der Basis von nur einer einzigen Klimavariablen untersuchen zu können, erweist sich als zusätzlicher Vorteil (Mishra und Singh 2010, Ziese u. a. 2014). Zudem gibt es in den Zeitfenstern von 3 bis zu 12 Monaten einen sehr engen Zusammenhang zwischen dem SPI und dem des PDSI (Şenaut 2015).

Die größten Probleme bei der Berechnung des SPI treten in ariden Gebieten mit teils fragwürdiger Datenlage auf (Mishra und Singh 2010). Da nur der Niederschlag als Variable zur Berechnung des SPI verwendet wird, ist eine erhöhte Evapotranspiration - aufgrund von Klimaänderungen - nicht in dem Index abgebildet. (Ziese u. a. 2014) Ein weiterer Nachteil ist die Trägheit der Veränderung des Index, da sowohl der Anfang als auch das Ende einer Dürreperiode nur auf Monatsebene diagnostiziert werden und demnach Ereignisänderungen auf einer kürzeren Zeitskala nicht adäquat darin ausgedrückt werden können. Untersuchungen auf kleineren Skalen wären von Vorteil, allerdings fehlen hier oft die dazu benötigten Daten (Şenaut 2015).

Die Berechnung des SPI basierte auf der Idee der Standardisierung des Niederschlags über eine bestimmte zeitliche Skala. Die Standardisierung wird mittels der Formel ( 7 ) berechnet:

$$SP_i = \frac{P_i - \widehat{P}_{jk}}{\sigma} \quad (7)$$

$P_i$  ist hier der Niederschlag im Monat  $i$ ,  $\widehat{P}_{jk}$  der Mittelwert des Niederschlags für die Zeitreihe des Monats  $i$  von  $j$  bis  $k$ ,  $\sigma$  die dazugehörige Standardabweichung und  $j \leq i \leq k$ . Wendet man diese Standardisierung auf die zwei Zeitreihen für den Niederschlag in den beiden Untersuchungsgebieten an, ergibt dies die beiden Histogramme in Abbildung 5:

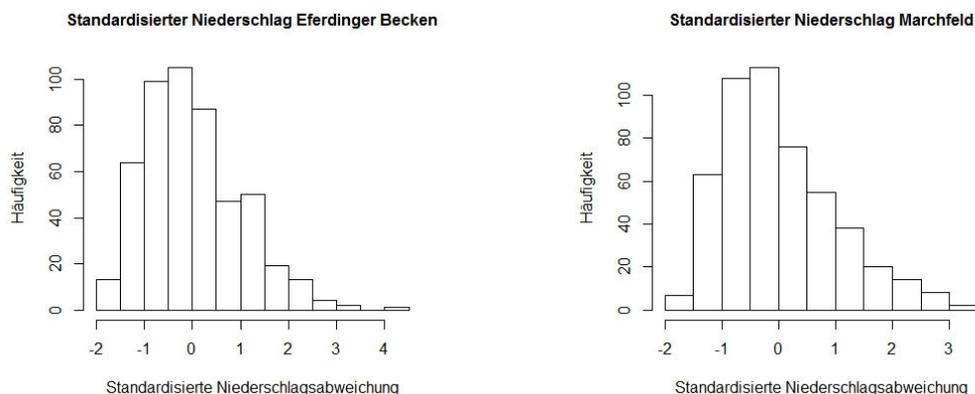


Abbildung 5 Standardisierter Niederschlag im Eferdinger Becken und im Marchfeld. Untersuchungszeitraum von 1971 bis 2012.

Die Berechnung erfolgte in R mittels der selbstgeschriebenen Funktion „stand\_mck“. Bei beiden Histogrammen wird deutlich, dass der Niederschlag eine rechtsschiefe Verteilung besitzt. 1993 entwickelte McKee anhand der Idee der Standardisierung des Niederschlags einen Dürreindex, welcher anhand von monatlichen Niederschlagsdaten berechnet wird.

Der erste Schritt der Berechnung des SPI ist die Aufsummierung der monatlichen Niederschlagssummen. Abhängig von der gewählten Zeitskala – 1 bis 48 Monate – werden jeweils 1, 2, 3, 6, 12 oder 24 Monate addiert und so eine neue Zeitreihe gebildet. Der erste aufsummierte Monat für die 3-monatige Skala ist somit März 1971, der aus der Summe von Jänner 1971 bis März 1971 besteht. Wenn in der Folge von einem Dürreereignis im Monat März gesprochen wird, dann ist dies der letzte Monat des akkumulierten Zeitfensters. Dargestellt ist dies in Formel ( 8 ):

$$P_{j+i-1} = \sum_j^{j+i-1} P_j \quad (8)$$

Wobei  $P$  der Niederschlag im Monat  $j$  ist,  $j$  die Länge der Zeitreihe in Monaten und  $i$  das gewählte Zeitfenster.

Der nächste Schritt ist nun die Anpassung einer theoretischen Verteilung an die Dichtekurven der einzelnen Monate. McKee und Guttman verwenden hierfür eine Gamma-Verteilung, welche auch in dieser Arbeit angewandt wird. (Guttman 1998; McKee u. a. 1993; Asadi Zarch, Sivakumar, und Sharma 2015)

Die Gamma-Funktion  $\Gamma: (0, \infty) \rightarrow (0, \infty)$  ist in Formel ( 9 ) definiert (Schmidt 2009, S.466):

$$\Gamma(\gamma) := \int_0^{\infty} e^{-z} z^{\gamma-1} dz \quad (9)$$

Die Parameterschätzung der Gamma-Verteilung erfolgt mittels der Maximum-Likelihood-Methode (MLE), welche eine Methode zur Schätzung der Parameter eines Modells ist. In diesem Fall ist das Modell die Gammaverteilung der Summen der monatlichen Niederschläge und anhand der Maximum Likelihood (ML) Schätzung (Khalili u. a. 2011; Şenaut 2015, S.79; Asadi Zarch, Sivakumar, und Sharma 2015) erfolgt die Schätzung der Parameter der Gammaverteilung. Der ML-Schätzer des Durchschnitts von  $\beta$  maximiert die Likelihood-Funktion und ist die Nullstelle der Score-Funktion. Die Score Funktion ist in Formel ( 10 ) definiert (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009)

$$s(\beta) = \sum x_i \frac{d_i}{\sigma_i^2} (y_i - \mu_i) \quad (10)$$

$\beta$  wird über die Fisher-Matrix (Formel ( 11 )) berechnet:

$$F(\beta) = X'W X \quad (11)$$

Geschätzt werden im Fall der Gammaverteilung der Wert  $z$  – welcher als Skalierungsparameter angegeben werden kann, allerdings oftmals in unterschiedlicher Notation vorkommt.

Alternative Schreibweisen sind  $b$  oder  $\beta$ . Der zweite Parameter ist in der oben angegebenen Formel  $\gamma$ , des Öfteren auch als  $p$  oder  $\alpha$  beschrieben. Aufgrund der beiden Parameter lassen sich Erwartungswert, Varianz, Schiefe und die Momenterzeugende Funktion der Verteilung berechnen. Für die Schätzung wird die Funktion „fitdist“ des R-Package „fitdistrplus“ verwendet. Mittels der MLE werden die zwei Parameter der Gammaverteilung berechnet. Nicht näher definiert wird die Stichprobe an welche die Gamma-Verteilung angepasst wird. In dieser Arbeit wird für den Zeitraum von 42 Jahren für jeden Monat eine Verteilung angepasst (Asadi Zarch, Sivakumar, und Sharma 2015; Khalili u. a. 2011), um saisonale Schwankungen zu vermeiden.

Getestet werden die - jeweils aus allen Stationsdaten berechneten - Durchschnittszeitreihen für das Marchfeld und das Eferdinger Becken für alle Monate und alle Zeitskalen. Die Zeitreihen werden auf die unterschiedliche Anpassung an drei Verteilungen untersucht, die Gamma-Verteilung, die Weibull-Verteilung und die logarithmische Normalverteilung. Dies passiert mittels des AIC-Kriteriums und des BIC-Kriteriums, um die passende Verteilung für den SPI auszuwählen. Das „Akaike Information Criterion“ (AIC) ist eine Kennzahl zur Auswahl von Modellen. Im Vergleich zum Bestimmtheitsmaß  $R^2$  hat das AIC den Vorteil, dass es einen Strafterm einführt, der die Überanpassung an ein Modell vermeiden soll. Definiert ist das AIC in Formel ( 12 ):

$$AIC = -2l(\theta) + 2p \quad (12)$$

$2p$  ist hierbei der Strafterm der Modellanpassung. Es wird nicht der größte loglikelihood-Wert ( $2l$ ) zur Modellanpassung verwendet, sondern der geringste AIC-Wert. Damit sollen Modelle mit zu vielen Parametern vermieden werden (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009, S.477).

Das zweite verwendete Maß zur Auswahl der Verteilung ist das „Bayesian Information Criterion“. Der BIC selektiert im Normalfall Modelle welche weniger Parameter besitzen, da die Bestrafung einer Überparametrisierung stärker ist als beim AIC. Die Formel ( 13 ) des BIC lautet (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009, S.489):

$$BIC = -2l(\theta) + \log(n) * p \quad (13)$$

Da  $\log(n)$  bereits ab acht Beobachtungen größer ist als 2, bestraft das BIC (bei Modellen mit unterschiedlicher Parameteranzahl) bereits ab der Beobachtungszahl von 8 komplexere Modelle. Im Fall der Verteilungsauswahl für den SPI ist dies hinfällig, da die Modelle alle eine gleiche Anzahl an Beobachtungen ( $n$ ) besitzen. Würde man die Verteilung mit weniger Beobachtungen schätzen, wären aus diesem Grund der AIC- und BIC-Wert geringer. Die Auswahl der Modelle erfolgt in beiden Fällen bei einem minimalen AIC-, oder BIC-Wert. Für die Auswertung in Tabelle 5 ist anzumerken, dass der einzige Unterschied in der Berechnung des Strafterms liegt. Dieser ist beim BIC (und einer Fallanzahl vom 41) bei ca.  $3,7p$ , im Falle des AIC stagniert dieser bei  $2p$ .

Verteilung	AIC		BIC	
	Marchfeld	Eferdinger Becken	Marchfeld	Eferdinger Becken
<i>3 Monate</i>				
Weibull	433,8624	463,0854	437,3298	466,5527
Lnorm	431,1454	460,5813	434,6127	464,0486
Gamma	<b>430,8913</b>	<b>460,0411</b>	<b>434,3586</b>	<b>463,5084</b>
<i>6 Monate</i>				
Weibull	463,9029	485,7321	467,3582	489,1874
Lnorm	<b>459,4061</b>	<b>481,2481</b>	<b>462,8613</b>	<b>484,7034</b>
Gamma	459,4996	481,256	462,9549	484,7113
<i>12 Monate</i>				
Weibull	491,715	501,8745	495,1462	505,3057
Lnorm	<b>483,3774</b>	496,1072	<b>486,8086</b>	499,5383
Gamma	483,9239	<b>496,0734</b>	487,3551	<b>499,5046</b>
<i>24 Monate</i>				
Weibull	509,4848	515,6526	512,8626	519,0304
Lnorm	<b>500,4443</b>	<b>507,8992</b>	<b>503,8221</b>	<b>511,2769</b>
Gamma	501,0281	507,9907	504,4059	511,3685

Tabelle 5 AIC- und BIC-Werte für die Verteilungsanpassung des SPI, rot dargestellt sind die Minimum-Werte

Es werden folgende Verteilungen miteinander verglichen, die Weibull-Verteilung, die logarithmische Normalverteilung und die Gammaverteilung. Die verwendeten Daten waren die monatlichen Niederschlagszeitreihen des Marchfelds und des Eferdinger Beckens. Es wurde ebenso versucht eine Normalverteilung anzupassen. Die Ergebnisse hierfür sind ähnlich wie jene der Weibullverteilung. Für jeden Monat wird der BIC, beziehungsweise AIC-Wert, der Verteilungen berechnet und anschließend ein Durchschnittswert kalkuliert, welcher oben in der Tabelle abgebildet sind. Die Funktion „testvert“ dient zur Berechnung der AIC und BIC-Werte.

Der Vergleich der logarithmischen Normalverteilung mit der Gammaverteilung zeigt, dass die 6- und 24-monatigen Zeitreihen besser an eine logarithmische Normalverteilung angepasst werden können. Die 3-monatige Zeitreihe allerdings besser an die Gammaverteilung und bei der 12-monatigen Zeitreihe differieren die Ergebnisse in den Untersuchungsgebieten. Da die Unterschiede bei den 6-monatigen Zeitreihen nur sehr gering sind und landwirtschaftliche Dürren zumeist mit den dreimonatigen Dürreperioden in Beziehung gesetzt werden, wird dem Vorschlag von McKee und Guttman folgend die Gammaverteilung verwendet. Die für den SPI geschriebene Funktion in R, sowie der Test für die beiden Kriterien, beinhalten die Möglichkeit die vier erwähnten Verteilungen zu testen, sowie zwischen AIC-Kriterium und BIC-Kriterium zu differenzieren.

Aufgrund der Gammaverteilung kann nun jedem gemessenen, aufsummierten Niederschlagswert eine Wahrscheinlichkeit zugewiesen werden. Dies passiert mit den jeweils angepassten Dichtekurven der Gammaverteilung. Der letzte Schritt der Berechnung des SPI ist die Umformung der Wahrscheinlichkeitswerte der kumulativen Verteilungsfunktion der Gammaverteilung in einen z-Wert (siehe Abbildung 6) der Normalverteilung (für die Umrechnung siehe Formel ( 19 )). McKee und Guttman sprechen in diesem Zusammenhang von einer inversen Gaußverteilung, dies ist allerdings nur bedingt richtig, da bei dieser Anwendung keine negativen Werte für den z-Wert möglich sind. Gemeint ist die Verteilungsfunktion der Normalverteilung und nicht deren Lage auf der X-Achse.

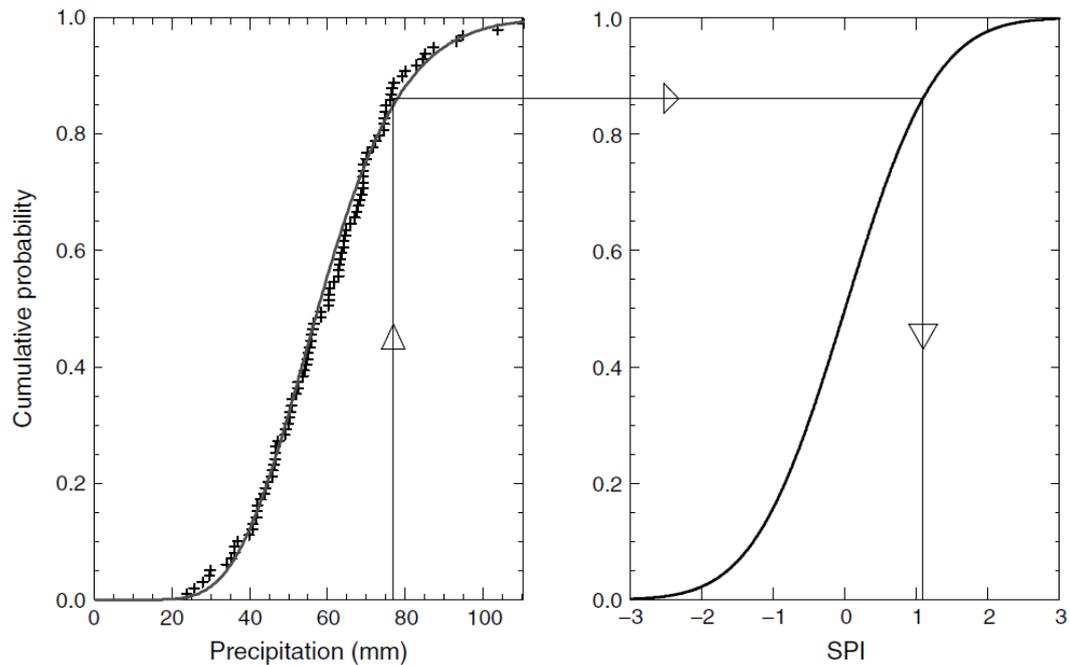


Abbildung 6 Umwandlung der kumulativen Wahrscheinlichkeit des Niederschlags in den Z-Score des SPI, Quelle: (Lloyd-Hughes und Saunders 2002)

Der SPI nimmt somit nur Werte zwischen -5 und +5 an. McKee beschreibt Dürreperioden ab einem z-Wert von -1,5 als starke Dürreperioden und ab -2 als extreme Dürreperioden. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer starken oder extremen Dürre beträgt somit 6,7%. Der Beginn der Dürre ist beim SPI mit dem Sinken des Wertes unter 0 festgelegt, sowie das Ende mit dem ersten SPI Wert über 0 (Şenaut 2015, S.77). Ein weiterer Ansatz ist Dürren als Perioden zu bezeichnen, in denen der Wert < -1 ist (Serinaldi u. a. 2009).

SPI Werte	Dürre-Kategorie	Wahrscheinlichkeit
0 bis -0,99	Milde Dürre	~ 24%
-1 bis -1,49	Gemäßigte Dürre	9,2%
-1,5 bis -1,99	Starke Dürre	4,4%
≤ -2	Extreme Dürre	2,3%

Tabelle 6, SPI-Werte nach McKee et al. 1993

#### 4.3. Der Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

Der SPEI wurde von Vicente-Serrano (Vicente-Serrano u. a. 2015; Beguería u. a. 2014; Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno 2010) als Gegenstück zum selbst-kalibrierten PDSI entwickelt. Aufbauend auf der Methodik des SPI – eine schiefe Verteilung in eine symmetrische umzuwandeln – wird beim SPEI ein zusätzliches Klimaelement integriert, die Evapotranspiration. Aufgrund der derzeitigen Klimaänderung ist es sinnvoll Dürreindizes zu kreieren, welche den Temperaturanstieg und dessen Auswirkungen miteinbeziehen (Spinoni u. a. 2015; Hao und Singh 2015). Ebenso korreliert der 6 – 12 monatige SPEI mit dem sc-PDSI in Europa, weswegen er als Indikator für landwirtschaftliche Dürren passend ist (Spinoni u. a. 2015), aber ebenso für hydrologische Dürren (Haslinger u. a. 2014).

Der SPEI wird basierend auf einer monatlichen klimatischen Wasserbilanz berechnet. Die klimatische Wasserbilanz ist in Formel ( 14 ) definiert (Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno 2010):

$$D_i = P_i - PET_i \quad (14)$$

Wobei  $D$  die klimatische Wasserbilanz darstellt,  $P$  den Niederschlag,  $PET$  die potentielle Evapotranspiration und  $i$  den Monat. Die Modelle der Evapotranspiration werden im nächsten Kapitel besprochen. Ähnlich wie beim SPI kommt es nun zur Aufsummierung der einzelnen Monate, je nach benötigter Zeitskala (Haslinger, Schöner, und Anders 2015). In dieser Arbeit wird der Index mit einer 1, 2, 3, 6, 12 und 24-monatigen Skala verwendet, äquivalent zum SPI. Wie beim SPI, gilt der genannte Monat als der letzte des Zeitfensters. Bei einer dreimonatigen Zeitskala und einer Dürre im März 1980 bedeutet dies, dass die Monate Jänner 1980, Februar 1980 und März 1980 aufsummiert wurden.

Wie beim SPI wird die Zeitreihe in alle zwölf Monate aufgeteilt und für jeden einzelnen Monat eine theoretische Verteilung angepasst. Nachdem der SPEI als Differenz berechnet wird, ergeben sich auch negative Werte. Demgemäß kann nicht wie beim SPI die Zwei-Parameter Gammaverteilung verwendet werden. Für diese Arbeit wird die generalisierte logistische Verteilung angewandt. Beispiele für andere, für die vorliegenden Daten geeignete Verteilungen, sind die generalisierte Lognormal-Verteilung, die Drei-Parameter Pearson III Verteilung oder die Extremwert-Verteilung. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass Vicente-Serrano u.a. (2010) in ihrer Studie die logistische Normalverteilung und die Log-Logistische Verteilung verwenden. Beide Verteilungen sind nur für positive Werte definiert, es muss daher auf die „generalized distributions“ rückgegriffen werden. Sie besitzen drei Parameter und sind auch für den negativen reellen Zahlenraum definiert. Um die theoretischen Verteilungen anzupassen, müssen sie transformiert werden. Die 3-Parameter log-logistische Dichteverteilung ist in Formel ( 15 ) definiert (Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno 2010):

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (15)$$

$\alpha$  ist der Skalierungsparameter,  $\beta$  ist der Positionierungsparameter und  $\gamma$  ist der Herkunftsparameter. Um die Verteilung an die Daten anzupassen, erfolgt zuerst die Berechnung der L-Momente. Anhand der L-Momente kann in weiterer Folge nicht nur eine spezifische Verteilung, sondern es können verschiedene Verteilungen berechnet werden. Die Schätzung der Parameter passiert mittels den L-Momenten. Gegenüber der Methode der Momente-Schätzung haben sie den Vorteil genauer zu sein und sind teilweise exakter als die Maximum-Likelihood-Methode. Die ersten vier L-Momente sind gegeben in Formel ( 17 ) (Hosking 1990):

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= EX \\
\lambda_2 &= \frac{1}{2} EX (X_{2:2} - X_{1:2}) \\
\lambda_3 &= \frac{1}{3} E (X_{3:3} - 2X_{2:3} + X_{1:3}) \\
\lambda_4 &= \frac{1}{4} E (X_{4:4} - 3X_{3:4} + 3X_{2:4} - X_{1:4})
\end{aligned}
\tag{17}$$

$\lambda_1$  und  $\lambda_2$  können als Maß für die Verteilungsparameter Lage und Skala verwendet werden. Die Schiefe und Wölbung ist gegeben durch  $\tau_3$  und  $\tau_4$  in Formel ( 16 ) (Hosking 1990).

$$\begin{aligned}
\tau_3 &= \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \\
\tau_4 &= \frac{\lambda_4}{\lambda_2}
\end{aligned}
\tag{16}$$

Für die Berechnung wird im R-Package „lmomco“, die Funktion „lmoms“ verwendet. Die L-Momente werden für alle Monate kalkuliert, um genauere Abschätzungen des SPEI zu bekommen. Begueria u.a. (2014) empfehlen in ihrer Studie die Parameter mittels Maximum-Likelihood oder der Momentfunktion zu schätzen. Diese beiden Methoden werden in dieser Analyse ausgelassen, da die Berechnung mittels der L-Momente als robust gilt. Mittels der L-Momente können nun die Parameter für die Verteilungen der einzelnen Monate geschätzt werden. Benötigt wird dafür die Funktion in R „parglo“ (lmomco). Mittels der kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktion der log-logistischen Verteilung können so den einzelnen Werten der klimatischen Wasserbilanz, Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Die Formel der kumulativen log-logistischen Wahrscheinlichkeitsfunktion ist in Formel ( 18 ) gegeben durch (Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno 2010):

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}
\tag{18}$$

Eine Möglichkeit zur Berechnung bietet das „lmomco“-Paket in R, mittels der „cdfglo“-Funktion. Zum Abschluss erfolgt wie beim SPI die Transformation in einen Z-Score (vergleiche dazu Abbildung 6). Vicente-Serrano u.a. (2010) geben dafür eine Approximation (siehe Formel ( 19 )) an, die wie folgt lautet:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}
\tag{19}$$

Wobei  $C_0 = 2,515517$ ,  $C_1 = 0,802853$  und  $C_2 = 0,010328$ , sowie  $d_1 = 1,432788$ ,  $d_2 = 0,189269$  und  $d_3 = 0,0001308$ . W ist in Formel ( 20 ) definiert:

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (20)$$

Die Formel gilt für  $P \leq 0,5$ , bei  $P > 0,5$  wird  $P$  ersetzt mit  $1-P$  und das Vorzeichen geändert.

Die Berechnung des SPEI erfolgt in R mittels der Funktion „spi\_eig“. Als Dateninput wird die monatliche klimatische Wasserbilanz, sowie das gewünschte Zeitfenster benötigt. Wie bereits erwähnt wird der SPEI gegenüber dem RDI bevorzugt, da dieser bei einer PET von 0 nicht definiert ist. Die Herausforderung beim SPEI besteht in der Modellierung der Evapotranspiration (Ziese u. a. 2014), diese soll nun im nächsten Kapitel näher beschrieben werden.

#### 4.4. Evapotranspiration

Die Evapotranspiration setzt sich aus Transpiration und Evaporation zusammen. Transpiration ist die Verdampfung von Wasser über Pflanzenoberflächen. Unterschieden werden hierbei die Verdunstung über den Stomata-Öffnungen der Pflanze und die cuticuläre Transpiration – dies ist die Transpiration an der gesamten Oberfläche des Blattes. Evaporation ist die direkte Verdunstung über freien Bodenoberflächen und über Wasseroberflächen. Die Summe dieser beiden Größen ist die Evapotranspiration (Allen u. a. 1998). Die Evapotranspiration ist Teil der Wasserbilanz und der Energiebilanz der Erde. In der Energiebilanz (siehe Formel ( 21 )) kommt sie als latente Wärme vor (Allen u. a. 1998):

$$R_n = G + H + ET \quad (21)$$

mit  $R_n$  die solare Einstrahlung,  $G$  ist der Bodenwärmestrom,  $H$  die sensible Wärme und  $ET$  die Evapotranspiration. In der Wasserbilanz ist die Evapotranspiration ebenso enthalten (Zhao u. a. 2013). Die Wasserbilanzgleichung (siehe Formel ( 22 )) ist gegeben durch (<http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/wasserbilanz/17962>):

$$P = V + A - Z + S \quad (22)$$

mit  $P$  dem Niederschlag,  $A$  der ober- und unterirdische Abfluss,  $S$  der Wasserspeicher,  $Z$  der ober- und unterirdische Zufluss und  $V$  die Verdunstung.

Beeinflusst wird die Evapotranspiration von zahlreichen Variablen. Einen Aspekt stellen klimatische Faktoren wie Windgeschwindigkeit, Strahlung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit dar. Betrachtet man landwirtschaftliche Flächen, spielen die Art der Feldfrucht, die Dichte des Bewuchses, die Höhe der Pflanzen oder die Oberflächenrauigkeit eine Rolle. Eine große Bedeutung kommt auch dem Boden und dessen Bearbeitung zu. (Allen u. a. 1998) Diese vielen Parameter machen eine Abschätzung der Evapotranspiration komplex, weswegen zwischen zwei Arten differenziert wird. Einerseits betrachtet man die aktuelle Evapotranspiration (AET), die all diese Faktoren versucht miteinzubeziehen, beziehungsweise – zum Beispiel mittels eines Lysimeters - gemessen werden kann. Die Messung gestaltet sich aber als kosten- und arbeitsintensiv (Kumar, Jat, und Shankar 2012). Andererseits kann die potentielle Evapotranspiration, welche sich auf klimatische Faktoren beschränkt, untersucht werden. In dieser Arbeit wird dafür die Abkürzung PET verwendet. Die PET beachtet keine Pflanzen- oder Bodencharakteristika und geht von einem unendlich zur Verfügung stehenden Wasserangebot aus und kann als die atmosphärische Nachfrage nach Wasser definiert werden (Allen u. a. 1998;

Beguería u. a. 2014). Für die Berechnung des SPEI ist die aktuelle Evapotranspiration ein schlechter Schätzer, da sie in Abhängigkeit zum verfügbaren Wasser steht, welches zu großen Teilen wieder aus dem Niederschlag resultiert. Im Gegensatz dazu, ist die PET nur von der Sonneneinstrahlung abhängig. Außerdem kann mittels der PET ein Schwellenwert für den Hitzestress von Pflanzen festgelegt werden. Dieser wäre aber in einer Analyse der AET nicht ersichtlich, da Pflanzen unter Hitzestress ihren Gas- und Nährstoffaustausch mit der Umwelt senken. (Beguería u. a. 2014)

Für die Berechnung der PET wurde eine Vielzahl von Methoden entwickelt, welche drei unterschiedliche Ansätze verfolgen. Es handelt sich dabei um energiebasierte Modelle, temperaturbasierte Modelle oder auf den Luftmassentransfer aufbauende Modelle (Zhao u. a. 2013; Kumar, Jat, und Shankar 2012). Beispiele für energiebasierte Modelle sind jene von Turc, Makkink, Jensen und Haise, Doorenbos und Pruitt oder Priestley und Taylor. Nachdem energiebasierte Modelle eine größere Vielfalt an Daten als Input benötigen, wurden noch temperaturbasierte Modelle entwickelt, wie jene von Thornthwaite (Thornthwaite 1948), Hargreaves (Hargreaves und Allen 2003) oder die Blaney-Criddle-Method (Zhao u. a. 2013). Die besten Ergebnisse liefert die Methode von Penman-Monteith (Allen u. a. 1998), welche von der „Food and Agricultural Organization of the United Nations“ (FAO) zur Berechnung empfohlen wird, allerdings ist dafür ein breites Spektrum an klimatologischen Daten erforderlich (Kumar, Jat, und Shankar 2012). Aus diesem Grund wurden für diese Arbeit zwei Modelle ausgewählt, die einen geringen Input an Daten benötigen und für den SPEI als Berechnung empfohlen werden. Diese sind neben der P-M-Methode, die Hargreaves Methode und die Thornthwaite-Methode (Vicente-Serrano u. a. 2015; Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno 2010; Beguería u. a. 2014). Die Hargreaves-Methode empfiehlt sich dadurch, dass in Studien ähnliche Ergebnisse wie mit der P-M-Methode erzielt wurden (Xu und Singh 2001; Beguería u. a. 2014).

#### 4.4.1. PET nach Thornthwaite

Die Methode zur Berechnung der PET nach Thornthwaite wurde im Jahr 1948 von ihm selbst entwickelt. Sie basiert allein auf Temperaturmessungen und der maximal möglichen Sonneneinstrahlung pro Tag. Die Gleichung (siehe Formel ( 23 )), die Thornthwaite im Jahr 1948 aufstellte, ist wie folgt definiert:

$$PET = 1,6 * \left(\frac{10t}{I}\right)^a \quad (23)$$

$I$  ist in Formel ( 24 ) beschrieben durch:

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (24)$$

wobei  $t$  die monatliche Durchschnittstemperatur angibt. Der zweite Parameter  $a$  ist definiert in Formel ( 25 ):

$$a = 0,0000006751^3 - 0,00007711^2 + 0,017921 + 0,49239 \quad (25)$$

Diese Gleichung wurde in einer leicht abgeänderten Form (Formel ( 26 )) nach Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno (2010); Xu und Singh (2001) formuliert:

$$PET = 16K * (10t/I)^m \quad (26)$$

Thornthwaite berechnete 1948 die PET in cm und nicht in mm, weswegen die Konstante von 1,6 mit 10 multipliziert werden muss.  $t$  ist weiterhin die monatliche Durchschnittstemperatur und  $I$  ist definiert wie bei Thornthwaite. Der Exponent  $a$  wurde bei Thornthwaite approximiert,  $m$  (siehe Formel ( 27 )) wir nun aber in Abhängigkeit von  $I$  berechnet:

$$m = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,79 * 10^{-2} * I + 0,492 \quad (27)$$

Laut Thornthwaite sollte der Index  $I$  eine Summe von 0 bis 160 ergeben und der Exponent  $a$ , wenn er berechnet wird, zwischen 0 und 4,25 variieren. Der Index  $I$  ergibt für das Marchfeld einen Wert von 41,88 und für das Eferdinger Becken einen Wert von 38,29. Der Exponent  $m$  ist im Marchfeld 1,156 und im Eferdinger Becken 1,102. Der hinzugefügte Parameter  $K$  (siehe Formel ( 28 )), der auch bei Thornthwaite bereits erwähnt wird, soll den Breitengrad des Ortes, beziehungsweise in diesem Fall des Untersuchungsgebietes miteinbeziehen.

$$K = \frac{N}{12} * \frac{NDM}{30} \quad (28)$$

$NDM$  ist die Anzahl der Tage in jedem Monat. Im Falle eines Schaltjahres wird der Februar mit 28 Tagen kalkuliert.  $N$  ist die maximale Sonnenscheindauer, beziehungsweise der Durchschnittswert eines Monats und ist definiert in Formel ( 29 ):

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) * \omega_s \quad (29)$$

mit  $\omega_s$  als dem Sonnenwinkel, der über Gleichung ( 30 ) berechnet wird:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (30)$$

$\varphi$  ist der Breitengrad des Ortes in Radiant,  $\delta$  ist die Sonnendeklination in Radiant, welche in Formel ( 31 ) gegeben ist:

$$\delta = 0,4093 \sin\left(\frac{2 * \pi * J}{365} - 1,405\right) \quad (31)$$

$J$  ist der Julianische Tag des Jahres (alle Formeln in diesem Kapitel nach: Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno 2010). Hier wird immer der Durchschnittstag pro Monat gewählt, nämlich der erste Tag des Monats plus den letzten Tag des Monats und die Summe daraus wird halbiert. Das ergibt über das Jahr verteilt die Werte 16, 45.5, 75, 105.5, 126, 166.5, 197, 228, 258.5, 289, 319.5 und 350. Die maximale Sonnenscheindauer ist somit über den gesamten Zeitraum für jedes Monat im Jahr ident und ist in Abbildung 7, exemplarisch für einen Ort am 48. Breitengrad, dargestellt.

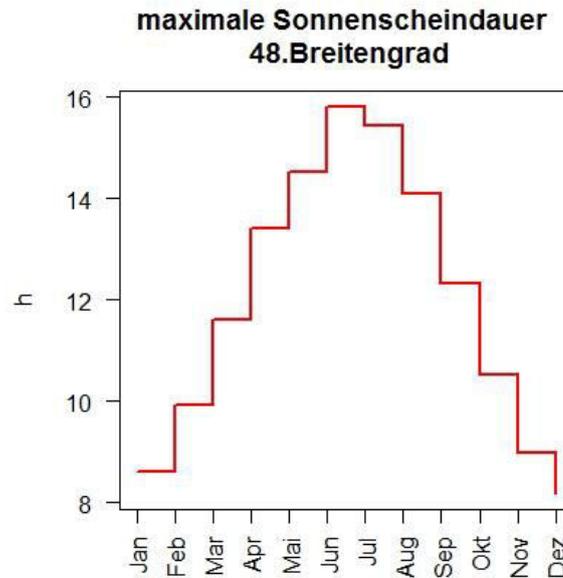


Abbildung 7 potentielle maximale durchschnittliche Sonnenscheindauer im Monat für einen Ort am 48.Breitengrad

#### 4.4.2. PET nach Hargreaves

Hargreaves entwickelte seine Methode, um der komplex und mit viel Dateninput zu berechnenden Penman-Monteith-Methode eine Alternative zu bieten. Die Hargreaves Gleichung hat eine hohe Korrelation mit den Ergebnissen von Penman-Monteith und ebenso mit Lysimetermessungen. In ariden Klimata unterschätzt das Modell die PET, in humiden Klimazonen wird sie überschätzt. Die Probleme bei den Ergebnissen auf Tagesbasis entstehen durch Frontwechsel, welche die Temperaturspanne beeinflussen und große Unterschiede in Windgeschwindigkeiten und Wolkenbedeckung hervorrufen (Xu und Singh 2001; Xu und Singh 2005; Beguería u. a. 2014; Hargreaves und Allen 2003). Die ersten Versuche einer Gleichung führten im Jahr 1975 zur Formel ( 32 ):

$$PET = 0,0135 * R_s * (TC + 17,8). \quad (32)$$

Die Gleichung wurde ursprünglich in Fahrenheit berechnet, weswegen zur monatlichen Durchschnittstemperatur  $TC$  noch 17,8 addiert werden muss. Den zweiten Parameter  $R_s$  stellt die solare Strahlung dar. Um die Gleichung zu vereinfachen wird die solare Strahlung über die extraterrestrische Strahlung berechnet. Aus diesen Überlegungen heraus entstand die Gleichung (siehe Formel ( 33 )), die Hargreaves und Samani 1985 aufstellten (Hargreaves, George und Samani, Zohrab 1985; Hargreaves und Allen 2003):

$$PET = 0,0023 R_a (TC + 17,8) TR^{0,5}. \quad (33)$$

$R_a$  ist die extraterrestrische Sonneneinstrahlung und  $TR$  die Temperaturspanne, je nach gewählter Zeitskala. Sollte die PET täglich berechnet werden, ist die Konstante in der Formel ( 36 ) der extraterrestrischen Sonneneinstrahlung 1440,  $TC$  und  $TR$  werden mit den täglichen Minimum- und Maximum-Werten der Station Groß-Enzersdorf berechnet.  $TC$  wird als die halbierte Summe des täglichen Maximum- und Minimum-Wertes errechnet. Wird die PET auf einer monatlichen Basis berechnet, muss diese Konstante 1440 mit der Anzahl der Tage des

jeweiligen Monats multipliziert werden. Außerdem werden  $TC$  (siehe Formel ( 34 )) und  $TR$  (siehe Formel ( 35 )) als monatlicher Durchschnitt berechnet. Dafür werden die Temperaturdaten von Groß-Enzersdorf benutzt.

$$TC_i = \sum_1^n \widehat{TC}_d \quad (34)$$

$TC_i$  ist die monatliche Durchschnittstemperatur,  $TC_d$  die tägliche Durchschnittstemperatur und  $n$  die Anzahl der Tage des jeweiligen Monats.

$$TR_i = \sum_1^n \widehat{Tmax} - \sum_1^n \widehat{Tmin} \quad (35)$$

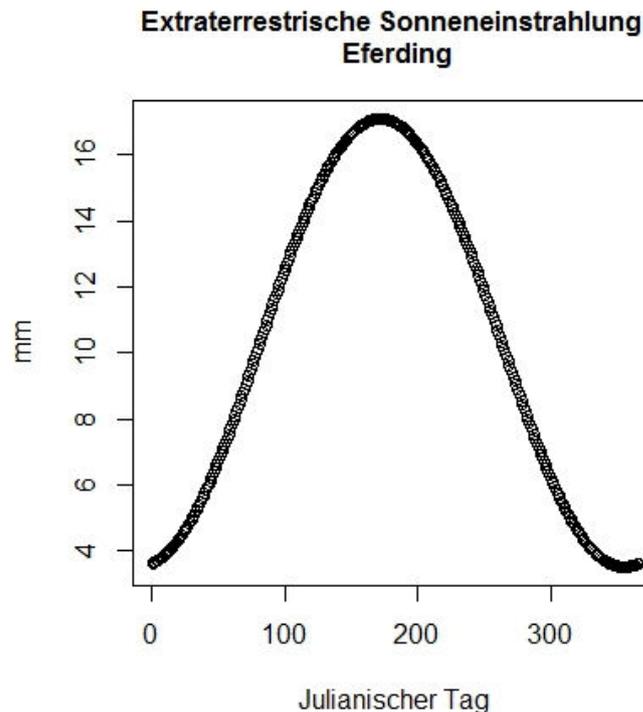
Wobei  $TR_i$  die durchschnittliche monatliche Temperaturspanne angibt,  $Tmax$  die tägliche Maximaltemperatur und  $Tmin$  die tägliche Minimaltemperatur, sowie  $n$  wieder die Anzahl der Tage des Monats. Die extraterrestrische Sonneneinstrahlung (siehe Formel ( 36 )) wird nach einer Vorgabe der FAO berechnet (<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e07.htm>).

$$R_a = \frac{1440 * (n)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s] \quad (36)$$

$G_{sc}$  ist die Solarkonstante, welche mit 0,0820 MJ m<sup>2</sup> min angegeben ist.  $\omega_s$  und  $\delta$  sind die bei Thornthwaite ebenso berechneten Werte des Sonnenstandes (Formel ( 30 )) und der Sonnendeklination (Formel ( 31 )).  $n$  ist die Anzahl der Tage des jeweiligen Monats bei Berechnung auf einer monatlichen Basis.  $\varphi$  ist wie zuvor der Breitengrad und  $d_r$  ist die inversrelative Distanz der Erde zur Sonne, die durch Gleichung ( 37 ) gegeben ist:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (37)$$

$J$  ist der Julianische Tage, da in diesem Fall jeder einzelne Tag berechnet wird, sind auch Schaltjahre in die Rechnung integriert. Die extraterrestrische Sonneneinstrahlung für Eferding ist in Abbildung 8 dargestellt. Das Ergebnis ist das Verdunstungsäquivalent der potentiellen Sonnenenergie, angegeben in mm.



*Abbildung 8 Jahresgang der extraterrestrischen Sonneneinstrahlung in Eferding*

Der Koeffizient AHC (Adjusted Hargreaves Coefficient) von 0,0023 ist ein geschätzter Wert, der für jede Region getrennt berechnet werden kann. Da die Gleichung nicht für alle Klimazonen gleichermaßen gültig ist, existieren Möglichkeiten die Gleichung an die regionalen Gegebenheiten anzupassen. Es gibt unterschiedliche Verfahren einzelne Parameter, beziehungsweise Koeffizienten der Hargreaves-Gleichung zu schätzen. Die Abschätzung des AHC-Koeffizienten mittels einer linearen Regression gegen eine Zeitreihe des Penman-Monteith-Modells oder einer gemessenen Verdunstungszeitreihe sind zwei Möglichkeiten davon. Eine Zeitreihe des Penman-Monteith-Modells steht für keines der Untersuchungsgebiete zur Verfügung. Allerdings existiert vom Hydrographischen Dienst für Franzensdorf eine Verdunstungszeitreihe in täglicher Auflösung. Da in dieser Zeitreihe nur wenige Monate vollständig vorhanden sind und eine Vielzahl an Daten geschätzt hätten werden müssen, wird dieser zusätzlicher Bias nicht in Kauf genommen und ein anderes Schätzverfahren für den Parameter angewendet.

Marti et al. (2015) untersuchten in ihrer Studie mehrere Modelle zur Abschätzung des Parameters (AHC). Die Methoden reichten von rein temperaturgesteuerten Modellen, über Modelle mit Temperatur- und geographischen Daten, zu Modellen mit Temperatur-, geographischen und Wind- Daten, sowie zu temperaturunabhängigen Modellen, in denen nur Windmessungen und geographische Daten benötigt werden. Die besten Ergebnisse erlangten jene Modelle, welche die Faktoren Temperatur, Wind und geographische Breite und Länge beinhalteten. Da Windmessungen für diese Arbeit ebenso nicht verfügbar sind, wird jenes Modell (siehe Formel ( 38 )), das Temperatur und geographische Länge und Breite als Dateninput benötigt, verwendet. Dieses Modell ist nur geringfügig schwächer mit einem  $R^2$  von 0,9 und bewährt sich gegen rein temperaturgesteuerte Parameterberechnungen. (Martí u. a. 2015)

$$AHC = 0,00370405 - 0,000149196 * \Delta T + 0,000261214 * \tau + 7,52122 * 10^{-7} * z \quad (38)$$

$AHC$  ist der für die Hargreaves-Gleichung zu schätzende Parameter.  $\Delta T$  ist die durchschnittliche monatliche Temperaturspanne (Berechnung, siehe Formel ( 35 )),  $\tau$  der Längengrad und  $z$  die Höhe über dem Meeresniveau.

Für die Berechnung des Koeffizienten ( $AHC$ ) – sowie der PET - werden zwei verschiedene Methoden entwickelt. Einerseits wird die Kalkulation des Temperaturspanne für jeden Monat einzeln berechnet, demzufolge fließen 12 verschiedene Koeffizienten in die Berechnung der PET ein. Die zweite Methode ist das arithmetische Mittel der gesamten Zeitreihe, somit existiert im Anschluss nur ein  $AHC$ -Wert. Für die Berechnung der PET nach Hargreaves wurden mehrere verschiedene Funktionen programmiert: „har\_mod“, „har\_mon“ und „par\_har“. „par\_har“ dient der Parameterschätzung. „Har\_mon“ ist für die Berechnung auf monatlicher Basis, „har\_mod“ für die Berechnung auf Tagesbasis.

#### 4.5. Berechnung der Ernteerträge

Die Berechnung der Ernteerträge erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst werden die Bundesländerertragsdaten berechnet mittels der absoluten jährlichen Anbaufläche und des Ertrags. Die Ertragsdaten der Bezirke müssen auf deren Vollständigkeit geprüft werden, da von den 43 Jahren im besten Fall 26 zur Verfügung stehen. Nachdem Statistik Austria die einzelnen Kulturpflanzen im Laufe der Zeit unterschiedlich zu Gruppen zusammenfasste, werden nur solche Pflanzen verwendet, bei denen dies nicht der Fall ist. Ebenso wird bei der Auswahl der Getreidefrucht darauf geachtet, dass die Anzahl der zu schätzenden Variablen ( $m$ ) nicht jene der verfügbaren Variablen ( $n$ ) überschreitet. Die Voraussetzung, die erfüllt sein muss, ist also  $m < n$ . Die Schätzung (Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die lineare Regressionen der einzelnen Feldfrüchte, sowie die Konfidenzintervalle) der fehlenden Jahre erfolgt mittels einer linearen Regression (Formel ( 39 ) nach (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009)) zwischen dem Ertrag der Bundesländerfläche und der einzelnen Bezirke.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (39)$$

$y$  ist die Zielgröße, in diesem Fall der Ernteertrag des Bezirks.  $x_k$  die Einflussgröße, im Rahmen dieser Regression ist dies der zugehörige Ernteertrag des Bundeslandes.  $\beta_k$  ist die dazugehörige Steigung,  $\varepsilon$  ist der Fehler der Regression. Im Eferdinger Becken muss zwischen den zwei Bezirken Eferding und Urfahr-Umgebung unterschieden werden Die Abschätzungen werden immer für beide Untersuchungsgebiete getroffen. Um eine robuste Schätzung zu erhalten, werden die Daten auf Ausreißer hin untersucht. Dafür wird in R der „outlierTest“ des Pakets „car“ verwendet. Dieser verwendet die Bonferroni-Methode zur multiplen Testkorrektur, welche konservativ schätzt und nur wenige Ausreißer entdeckt (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009). Die Ausreißer werden aus der Berechnung für das lineare Modell in weiterer Folge ausgeschlossen, da für die Schätzung der Daten auf Bezirksebene der durchschnittliche Zusammenhang wichtiger ist, als Daten welche von diesem stark abweichen.

Für die Überprüfung der Modellgüte wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  (siehe Formel ( 40 )) verwendet, welches allerdings den Nachteil hat, bei zusätzlichen Kovariablen zu steigen. Ein

geeigneteres Maß ist deswegen das korrigierte Bestimmtheitsmaß, welches zusätzliche Variable bestraft. Gegeben ist es durch (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009):

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (40)$$

Mit den Koeffizienten der linearen Regression erfolgt die Berechnung der fehlenden Werte für die Bezirke.

Der nächste Schritt ist die Berechnung der Anomalien der Ernteerträge (Potop 2011; Potop, Možný, und Soukup 2012). Da sich die Ernteerträge seit den 1970er Jahren aufgrund des ökonomischen und technischen Fortschritts nicht auf gleichem Niveau bewegen, müssen die Erträge zuerst von ihrem Trend befreit werden. Dies passiert mittels Anpassung einer Polynomfunktion 1.-, 2.- oder 3. Grades. Die ausgewählte Polynomfunktion soll das  $R^2$  maximieren (Beispiele für die Polynomfunktion, siehe Abbildung 25). Mittels des Polynoms werden anschließend die Residuen berechnet. Diese werden noch standardisiert, mittels der Formel (41):

$$Y_{Ernte} = \frac{x_i - E(x)}{\sigma} \quad (41)$$

Um die Ernteerträge in Verbindung mit den Dürreindizes zu setzen, wird ein erweitertes lineares Modell (siehe Abbildung 27) verwendet. Für die Modellwahl wird die vollständige Modellselektion nach Furnival und Wilson (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009) verwendet. Der Algorithmus dieses Modelles vermeidet das vollständige Testen aller Modelle (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009). Nach Anwendung des Tests kann das beste Modell ausgewählt werden. Dabei ist aber zu beachten, dass das beste Modell nicht unbedingt jenes mit dem größten – in diesem Fall –  $R^2$  sein muss. Eine Simplifizierung – also eine geringere Zahl an Kovariablen kann zielführend sein (Fahrmeir, Kneib, und Lang 2009). Ähnliche Verfahren sind die Vorwärts-, Rückwärts-, oder die Schrittweise Selektion. Die Modellauswahl erfolgt in R mittels der Funktion „leaps“ aus dem gleichnamigen Paket.

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Ergebnisse des SPI im Marchfeld und im Eferdinger Becken

Für die Berechnung des SPI im Eferdinger Becken wurden die monatlichen Niederschlagszeitreihen von Aschach, Eferding, Ottensheim und Goldwörth verwendet. Im Marchfeld wurden die Niederschlagsdaten aus Baumgarten, Eckartsau, Franzensdorf, Gänserndorf, Lasse, Leopoldsdorf, Markthof, Obersiebenbrunn, Orth und Salmhof einbezogen. Diese Analyse der Ergebnisse beschränkte sich nur auf die Ergebnisse der Durchschnittszeitreihe der beiden Untersuchungsgebiete. Der durchschnittliche Niederschlag wurde über das arithmetische Monatsmittel der einzelnen Zeitreihen der Untersuchungsgebiete berechnet.

Die Variabilität des SPI reduziert sich bei der Betrachtung von größeren Zeitskalen. Untersucht man die Verteilung des SPI (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10) für einzelne Monate, erkennt

man, dass der SPI im Eferdinger Becken im Jänner (der genannte Monat ist immer der letzte des berechneten Zeitfensters) für sechs Monate vom Mittelwert 0 der Normalverteilung abweicht. Im Marchfeld lässt sich bei allen Zeitskalen eine leichte rechtsschiefe Verteilung erkennen. Insbesondere der 24-monatige SPI weicht vom Mittelwert 0 ab.

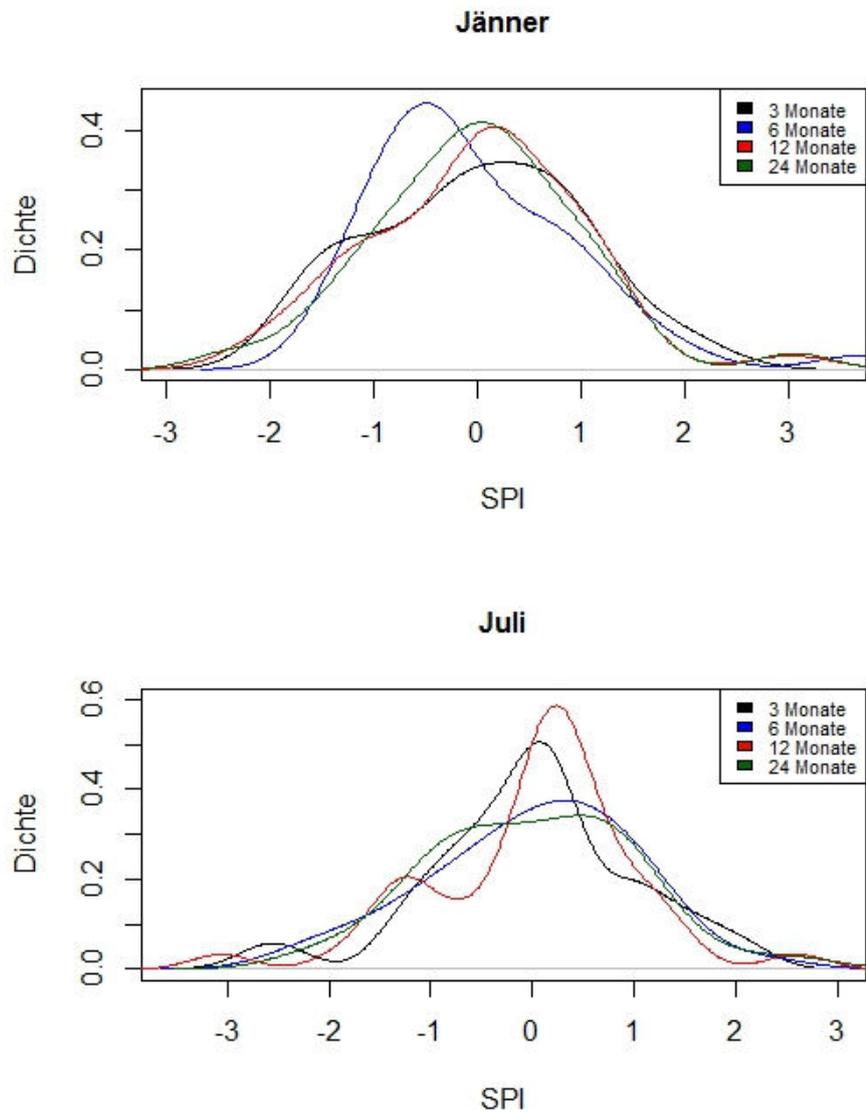


Abbildung 9 Verteilungskurven des SPI für das Eferdinger Becken im Jänner und im Juli für alle Zeitskalen. Jänner und Juli sind dabei die letzten Monate des berechneten Zeitfensters.

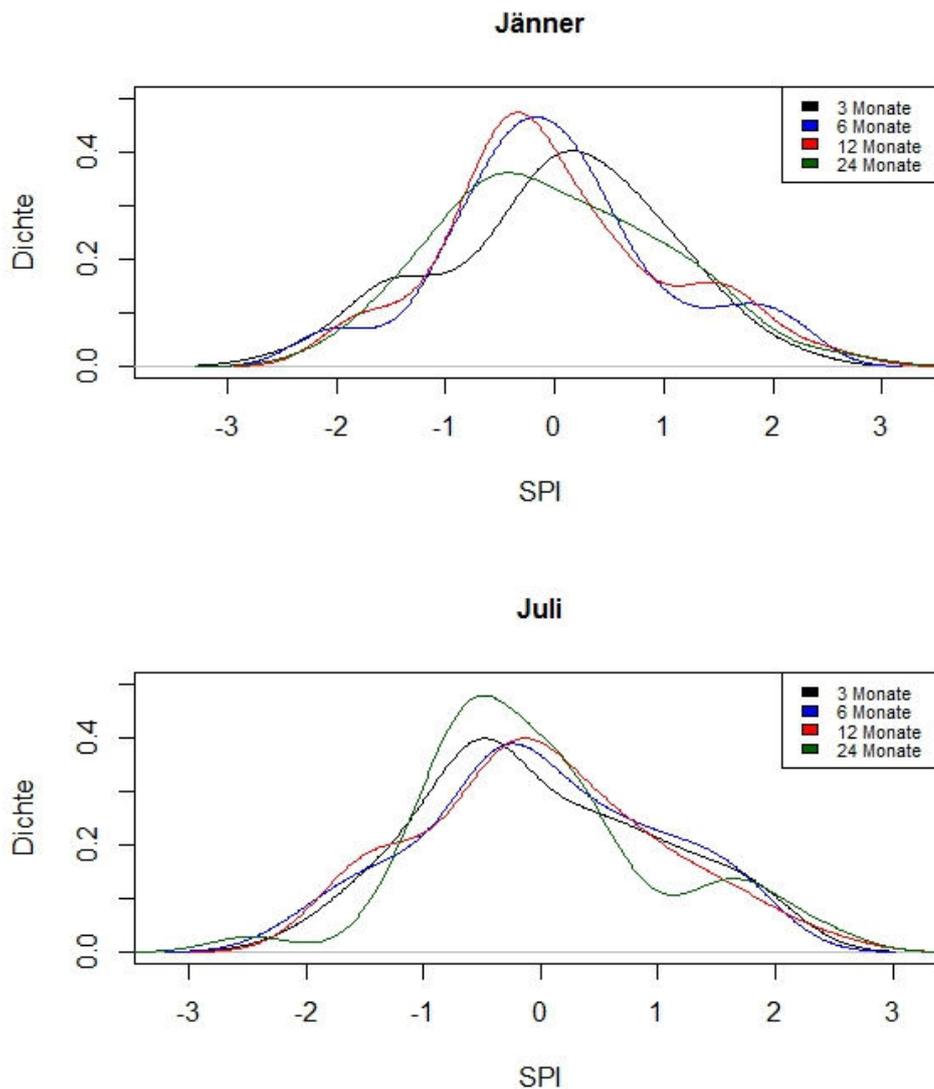


Abbildung 10 Verteilungskurven des SPI für das Marchfeld im Jänner und im Juli für alle Zeitskalen. Jänner und Juli sind dabei die letzten Monate des berechneten Zeitfensters.

Die Auswertung der Intensität der Dürreperioden, beziehungsweise ihrer Häufigkeit erfolgt nach dem Schema von McKee (Tabelle 6, SPI-Werte nach McKee et al. 1993). Eine milde Dürre hat bei McKee eine Eintrittswahrscheinlichkeit von ca. 24%. Diese tritt im Eferdinger Becken häufiger auf, nämlich in 28% – 34% der Fälle, im Eferdinger Becken liegen die Werte hier sogar bei 34% - 41%, was anhand der linksschiefen Verteilungen zu sehen ist. Die gemäßigten Dürreereignisse sollten mit einer Wahrscheinlichkeit von 9,2% auftreten. Hier liegen die Werte des Eferdinger Beckens bei 8% - 11%, im Marchfeld zwischen 9,2% und 11%. Starke und extreme Dürreperioden sollen laut McKee mit einer Wahrscheinlichkeit von 4,4% beziehungsweise 2,3% auftreten. Wie Tabelle 7 zeigt, liegen die Werte für die jeweiligen Dürreereignisse im Eferdinger Becken in diesem Bereich. Im Marchfeld (siehe Tabelle 8) ist die niedrige Anzahl an extremen Dürreperioden des 24-monatigen SPIs auffallend. McKee schränkt seine Gliederung ein, so dass er nur davon ausgeht, dass Werte  $< -1$  in langjährigen Klimaaufzeichnungen innerhalb dieser Häufigkeiten auftreten (McKee u. a. 1993).

Eferdinger Becken							
3 Monate		6 Monate		12 Monate		24 Monate	
Anzahl	p (n=502)	Anzahl	p (n=499)	Anzahl	p (n=493)	Anzahl	p (n=481)
166	0,33067729	171	0,34268537	140	0,28397566	163	0,33887734
41	0,08167331	49	0,09819639	56	0,11359026	37	0,07692308
25	0,0498008	25	0,0501002	23	0,04665314	20	0,04158004
12	0,02390438	10	0,02004008	10	0,02028398	16	0,03326403

*Tabelle 7 Anzahl und Häufigkeiten von Dürreperioden im Eferdinger Becken; Die Aufteilung erfolgte in die 4 berechnete Zeitskalen des SPI, sowie in das von McKee vorgeschlagene Schema.*

Marchfeld							
3 Monate		6 Monate		12 Monate		24 Monate	
Anzahl	p (n=502)	Anzahl	p (n=499)	Anzahl	p (n=493)	Anzahl	p (n=481)
172	0,343	182	0,365	202	0,410	192	0,399
50	0,100	46	0,092	46	0,093	53	0,110
21	0,042	26	0,052	22	0,045	12	0,025
11	0,022	9	0,018	8	0,016	4	0,008

*Tabelle 8 Anzahl und Häufigkeiten von Dürreperioden im Marchfeld*

Nachdem ca. 50% der Werte mögliche Dürreperioden sind, werden für die Analyse im Zusammenhang mit den Ernteerträgen nur jene ausgewiesenen Dürren untersucht, welche einen SPI-Wert  $< -1$  besitzen und somit eine ungefähre kumulative Eintrittswahrscheinlichkeit von 15% besitzen. Hierfür werden auch die ein- und zweimonatigen Dürreperioden miteinbezogen. Der Grund dafür ist, dass Dürreperioden Extremereignisse sind und eine Betrachtung aller Ereignisse zu viel an Information berücksichtigen würde.

Fokussiert man sich auf die starken und extremen Dürreereignisse, gibt es beim dreimonatigen SPI im Eferdinger Becken, zwölf Monate mit einem Wert  $< -2$ . Es handelt sich dabei um neun extreme Dürreperioden, von denen drei zwei Monate andauern und sechs nur einen Monat. Während von 1971 bis ca. 1991 extreme Dürreperioden immer in einem ungefähren Abstand von sieben Jahren auftreten, häufen sich von 1991 bis 1994 die Extremereignisse. In den letzten 18 Jahren des Untersuchungszeitraums treten sie nicht mehr auf. Ausgenommen von einer sechsmonatigen Dürre im Eferdinger Becken im April 2011 existieren im Untersuchungszeitraum seit dem Jahr 1994 keine extremen Dürren mehr. Deutlich wird auch, dass die extremen Dürreperioden des zwölf- und 24-monatigen SPI länger andauern. Dies ist bedingt durch den reduzierten Einfluss der einzelnen Monate. Charakteristisch dafür ist ein Dürreereignis des 24-monatigen SPI von Oktober 1983 bis August 1984, welche auch im Marchfeld und in einer Studie von Trnka et al. erwähnt wird (Trnka u. a. 2003). Die indirekte Relation von sinkender Häufigkeit und steigender Dauer bei größeren Zeitskalen wurde bereits von McKee formuliert (McKee u. a. 1993). Starke Dürreperioden treten auch nach 1994 auf.

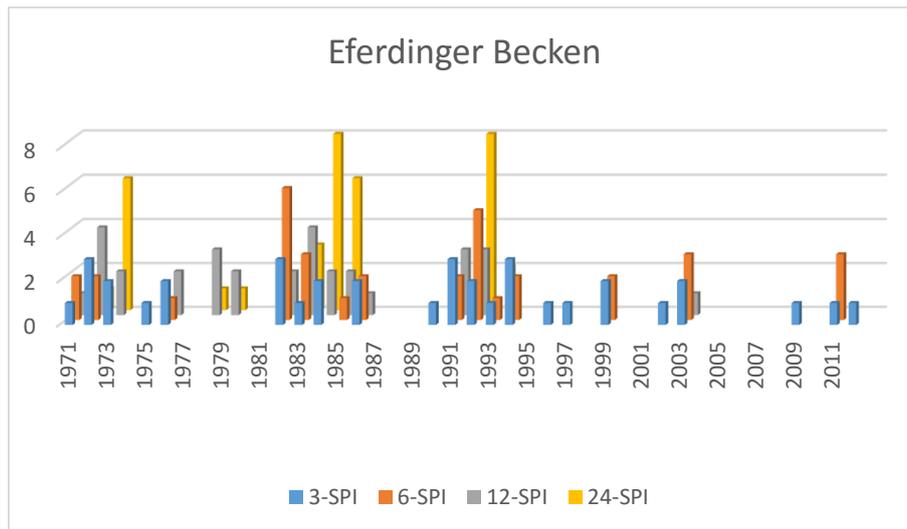


Abbildung 11 Verteilung von schweren und extremen Dürren im Eferdinger Becken über den gesamten Untersuchungszeitraum (1971-2012)

Im Marchfeld ereigneten sich extreme Dürreereignisse ebenso nach 1994, allerdings nur vereinzelt. Dreimonatige extreme Dürreereignisse kommen nach 1994 noch im Jahr 2000 und 2003 vor. Wobei die Dürreperiode 2003 im April stattfand, somit nicht mit der Hitzewelle 2003 in Europa ident ist. Wie gezeigt werden konnte, war der Niederschlag während dieser Hitzewelle nur ca. 20% unter dem langjährigen Mittel (Rebetez u. a. 2006). Besonders auffallend im Marchfeld ist, dass starke und extreme Dürreereignisse beim 24-monatigen SPI nur bis zum Jahre 1979 auftreten, anschließend existiert kein Wert mehr, der kleiner ist als  $-1,5$ . Eine graphische Darstellung der Verteilung der Dürreperioden ist in den Abbildung 11 und Abbildung 12 zu sehen. Eine Zunahme der Häufigkeit des Auftretens von Dürreereignissen (Spinoni u. a. 2015) kann hier nicht nachvollzogen werden.

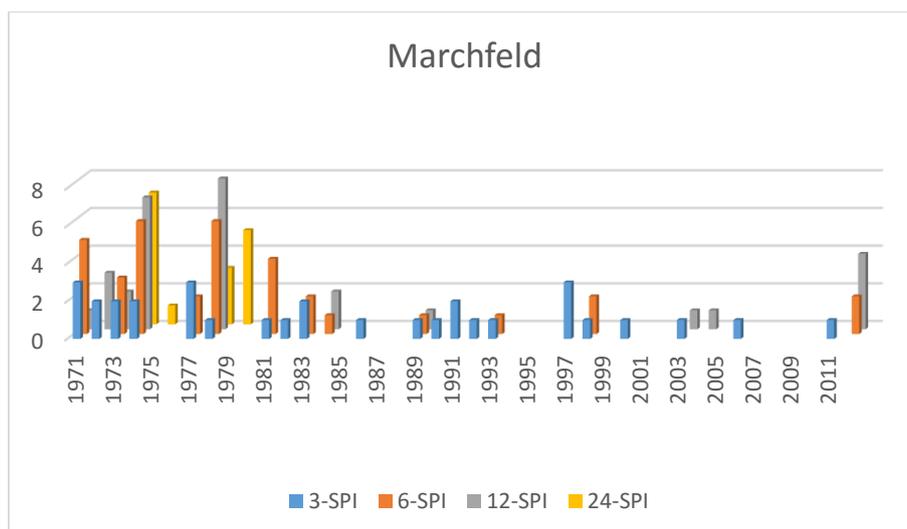


Abbildung 12 Anzahl der Monate von starken und extremen Dürren im Marchfeld über den gesamten Untersuchungszeitraum (1971-2012)

Bei der Analyse der Verteilungen der einzelnen Indizes im Juli und Jänner wurde bereits angemerkt, dass der zwölf- und 24-monatige SPI eine rechtsschiefe Verteilung besitzt, bei dem der Mittelwert von null abweicht. Ein Grund dafür könnte ein Trend in den

Niederschlagszeitreihen sein. Teilt man die Zeitreihe der standardisierten Niederschläge, ergibt sich im Marchfeld eine leichte Verschiebung des Mittelwertes. Aus diesem Grund werden die monatlichen Niederschläge auf einen Trend hin untersucht. Dazu wird die standardisierte monatliche Zeitreihe in der Hälfte geteilt um eine mögliche Abweichung der Mittelwerte zu untersuchen. Angewendet wird ein gepaarter T-Test. Geprüft wird, ob der Mittelwert des Niederschlags in den letzten 21 Jahren größer als jener zu Beginn des Untersuchungszeitraumes ist. Für das Eferdinger Becken ergibt dies einen p-Wert von 0,077 (für T-Test siehe Schönwiese 2013b). Da  $\alpha < p$ , wird die Nullhypothese beibehalten, da es zu keiner Verschiebung des Mittelwertes kommt. Im Marchfeld erhält man einen p-Wert von 0.015. Dies bedeutet, dass die Alternativhypothese angenommen werden muss, der mittlere abweichende Niederschlag sich also signifikant verändert. Dies könnte eine Begründung für die abnehmenden starken und extremen Dürreereignisse im Marchfeld in den letzten 20 Jahren sein. Noch deutlicher wird diese Verschiebung wenn nur der 24-monatige SPI für das Marchfeld betrachtet wird. Teilt man hier die Zeitreihe in zwei Teile wie beim T-Test, ergibt sich eine graphisch deutliche Verschiebung des Mittelwertes ins Positive (siehe Abbildung 13).

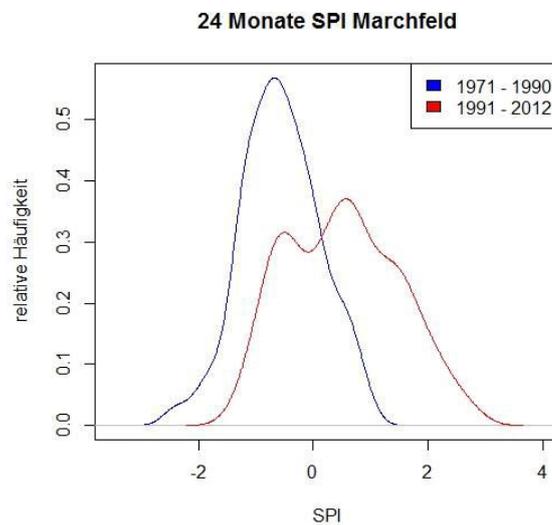


Abbildung 13 24-monatiger SPI für alle Monate im Marchfeld, Aufteilung der Zeitreihe in zwei Perioden.

Diese Verschiebung des Mittelwertes und die Abnahme der Dürreperioden bestätigen auch andere Studien (Auer u. a. 2007; Brunetti u. a. 2009). In einer für Europa durchgeführten Studie, wird im südwestlichen Europa von einem ansteigenden Trend von Dürreereignissen ausgegangen, im Osten Europas sinkt die Häufigkeit der Dürren (Spinoni u. a. 2015).

Die Trendanalysen können nicht für die einzelnen SPI-Zeitreihen durchgeführt werden, da der Mann-Kendall-Test die Vorzeichenveränderungen berechnet. Diese werden – stärker beim zwölf- und 24 monatigen SPI – aufgrund des saisonalen Zyklus in bestimmten Abständen auftreten. Aus diesem Grund werden jeweils die Schwankungen der einzelnen Monate untersucht. Während der 3-monatige SPI signifikante Trends nur von Juli bis Oktober aufweist, ist der positive Trend beim 12- und 24-monatigen SPI für alle Monate vorhanden. Der 6-monatige SPI zeigt einen positiven Trend von Juli bis Dezember und im Jänner. Im Eferdinger Becken hingegen kann nur beim 24-monatigen SPI im Jänner, Juni und September ein leichter positiver Trend eruiert werden. Dies bestätigt den durchgeführten T-Test der bereits eine Verschiebung des Mittelwertes erkannt hat. Allerdings stimmen die Ergebnisse teilweise – für das Eferdinger Becken treffen sie sehr wohl zu - nicht mit anderen Studien, die keine Trends in den Werten des SPI feststellen konnten, überein (Asadi Zarch, Sivakumar, und Sharma 2015;

Lloyd-Hughes und Saunders 2002). Diese beiden Studien wurden jedoch auf einer größerskaligen Ebene durchgeführt. Downgescalte Daten stellen sehr wohl einen Niederschlagstrend in Österreich fest, mit einer starken dekadischen Variabilität (Nachtnebel u. a. 2015). Für den Nordosten Österreichs erkannten Auer et al. einen positiven Trend des Niederschlags seit den 1970er Jahren (Auer u. a. 2007), diesen beschrieben auch Brunetti et al. (Brunetti u. a. 2009).

Die Korrelation zwischen den beiden Untersuchungsgebieten (Ergebnisse siehe Tabelle 9) ist hingegen sehr gering. Auffallend ist der geringe Korrelationskoeffizient nach Kendall. Aufgrund des unterschiedlichen klimatischen Einflusses sind hier andere Niederschlagsmuster zu erkennen, welche innerhalb des SPI reflektiert werden. Zusätzlich sei noch angemerkt, dass Niederschlag nur eine geringe örtliche Repräsentanz besitzt (Schönwiese 2013a).

	Kendall (tau)	Spearman (rho)	Pearson
3 Monate	0,365	0,52	0,518
6 Monate	0,342	0,496	0,494
12 Monate	0,324	0,468	0,461
24 Monate	0,336	0,497	0,449

Tabelle 9 Korrelationskoeffizienten zwischen den zwei Untersuchungsgebieten; Untersucht wurden alle 4 verwendeten Zeitskalen des SPI

Zum Abschluss werden die beiden Untersuchungsgebiete noch auf ihre Übereinstimmung im Erkennen von Dürreperioden untersucht. Dazu werden der 1-,2-,3-,6- und 12-monatige SPI berechnet und alle Werte, die kleiner -1 sind, mit 1 codiert, alle anderen Werte mit 0. Mit dieser binären Codierung kann nun eine Kontingenztafel (Beispiel für eine Kontingenztafel, siehe Tabelle 10) berechnet werden und diese mittels des Chi-Quadrat-Tests getestet werden. Führt man diesen Test durch, so ergibt sich für keines der Zeitfenster ein signifikanter Unterschied zwischen den Untersuchungsgebieten.

Ausprägungen Marchfeld	Ausprägungen Eferdinger Becken	
	Keine Dürre	Dürre
Keine Dürre	382	44
Dürre	44	34

Tabelle 10 Beispiel für eine Kontingenztafel; Hier wird der einmonatige SPI des Marchfelds mit dem einmonatigen SPI des Eferdinger Beckens verglichen. Dürre =  $SPI < -1$ , Keine Dürre =  $SPI > -1$ .

### 5.3. Ergebnisse der potentiellen Evapotranspiration im Marchfeld und im Eferdinger Becken

#### 5.3.1. Berechnungen der PET nach Thornthwaite

Die Auswertung der PET nach Thornthwaite erfolgt in R mit der Funktion „tw“, bei der nur die monatlichen Temperaturdaten und die unterschiedlichen Breitengrade als Eingangsdaten benötigt werden. Bei der Auswertung wird für beide Gebiete  $48,3^\circ$  als Breitengrad angenommen. Negative Temperaturen führen automatisch zu einer Nullsetzung der PET.

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
Aschach <sup>1</sup>	1,52	4,17	20,95	48,76	85,01	112,4	121,49	108,21	70,61	36,3	11,85	1,93	623,2
Eferding <sup>3</sup>	1,27	4,07	20,35	52,65	88,5	118,52	121,11	107,71	68,21	35,36	12,64	1,52	631,91
Ottensheim <sup>2</sup>	1,31	3,6	20,55	49,56	87,27	113,26	121,54	107,63	69,42	34,96	11,23	1,84	622,17
Goldwörth <sup>1</sup>	1,21	3,57	18,9	51,27	88,01	114,34	124,01	108,98	69,57	36,09	11,5	1,46	628,91
Obersiebenbrunn <sup>4</sup>	1,63	4,96	21,59	43,59	80,07	109,99	120,19	108,3	71,45	34,97	12,11	3,25	612,1
Franzensdorf <sup>5</sup>	2,09	5,06	20,71	52,39	88,42	118,31	131,46	116,67	74,68	38,35	13,46	2,17	663,77
Gänsersdorf <sup>6</sup>	1,79	5,26	19,97	51,95	87,96	119,66	130,73	117,52	72,38	36,43	13,47	1,65	658,77
Leopoldsdorf <sup>6</sup>	1,62	5,14	20,47	51,65	88,05	120,13	131,65	118,01	72,77	36,8	13,74	1,54	661,57
Orth <sup>6</sup>	2,08	6,23	19,9	51,88	88,66	121,45	132,96	115,7	71,9	36,28	14,45	1,66	663,15
Salmhof <sup>3</sup>	1,93	4,78	19,43	52,77	89,05	122,08	127,25	114,71	73,88	39,23	15,62	2,71	663,44

Tabelle 11 Durchschnittliche monatliche PET in mm nach Thornthwaite für alle Stationen; 1 = Daten vorhanden von 1971 – 2012, 2 = 1983 – 2012, 3 = 1996 – 2012, 4 = 1971 – 1980, 5 = 1981 – 2012, 6 = 1990 – 2012; rot sind die Stationen des Eferdinger Beckens, blau jene des Marchfelds.

Betrachtet man Tabelle 11, erkennt man die etwas geringere PET im Eferdinger Becken. Einzig Obersiebenbrunn fällt zu den anderen Stationen im Marchfeld ab. Die geringere PET ergibt sich aus der Abhängigkeit zur Temperatur und des Temperaturtrends der letzten 40 Jahre. Die Temperaturzeitreihe von Obersiebenbrunn läuft nur von 1971 bis Ende 1980. Da die PET nach Thornthwaite nur von der Temperatur abhängig ist, ist die deutlich niedrigere PET in Obersiebenbrunn auf die steigende Temperatur seit den 1980er Jahren zurückzuführen. Aus den einzelnen Temperaturzeitreihen der Stationen wird ein Gebietsmittel für die beiden Untersuchungsgebiete berechnet. Die PET für das Eferdinger Becken und dem Marchfeld wird anschließend aus dieser Temperaturzeitreihe berechnet. Der Jahresgang der PET (siehe Abbildung 14) ist in den beiden Untersuchungsgebieten gleich, allerdings lassen sich die höheren Werte im Sommer im Marchfeld auf die dort vorherrschenden wärmeren Bedingungen zurückführen.

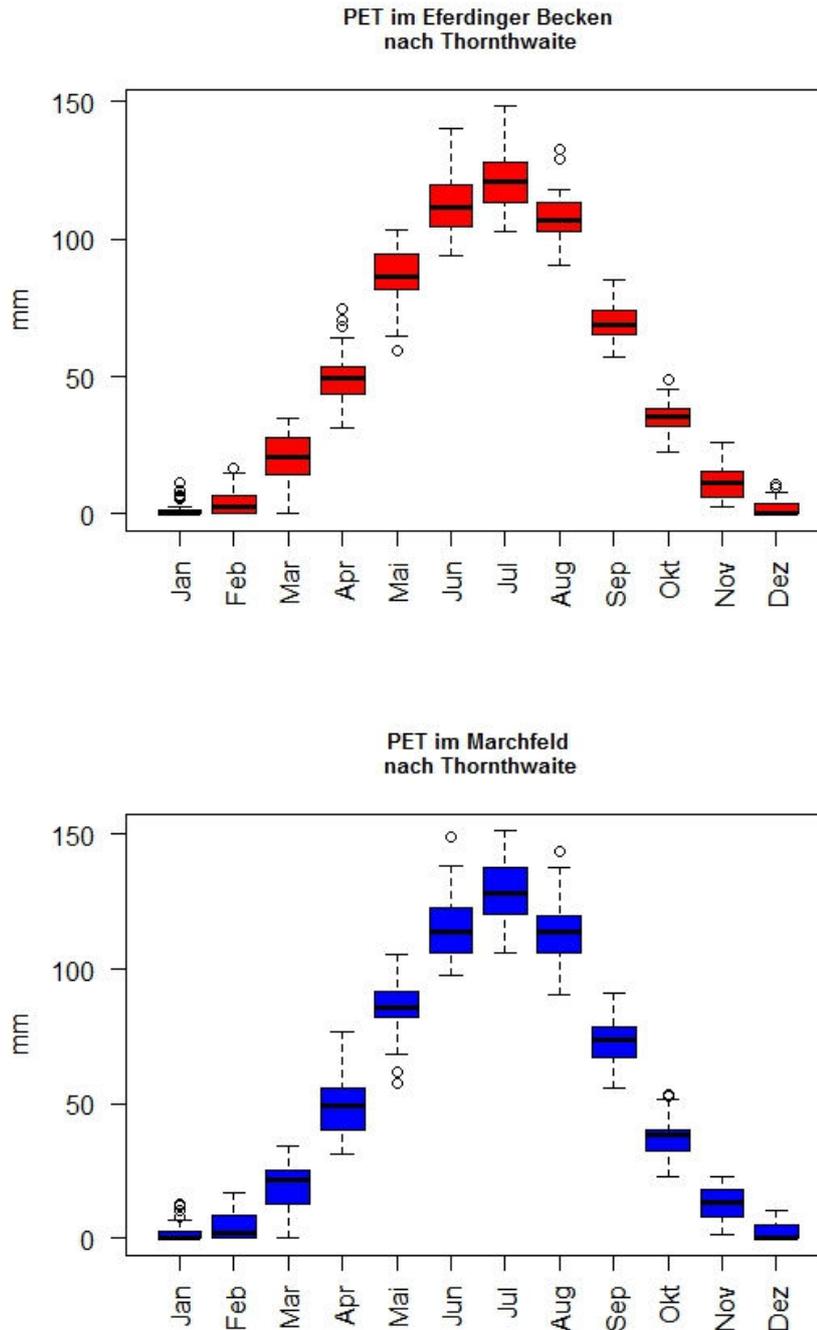


Abbildung 14 Boxplots der PET nach Thornthwaite für das Eferdinger Becken und das Marchfeld

Die Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung wird bei der Thornthwaite-Methode deutlich, wenn man die jährlichen Abweichungen berechnet. Dafür werden für das Marchfeld und das Eferdinger Becken die jährlichen Summen der PET berechnet. Aus diesen wird jeweils ein Durchschnitt für die beiden Gebiete errechnet und dieser anschließend von den jährlichen Summen subtrahiert. Die Resultate sind in Abbildung 15 dargestellt. Der Trend in den beiden Zeitreihen bestätigt sich mittels des Mann-Kendall-Tests. In beiden Untersuchungsgebieten ist der Trend – getestet bei einem  $\alpha$  von 5% - signifikant.

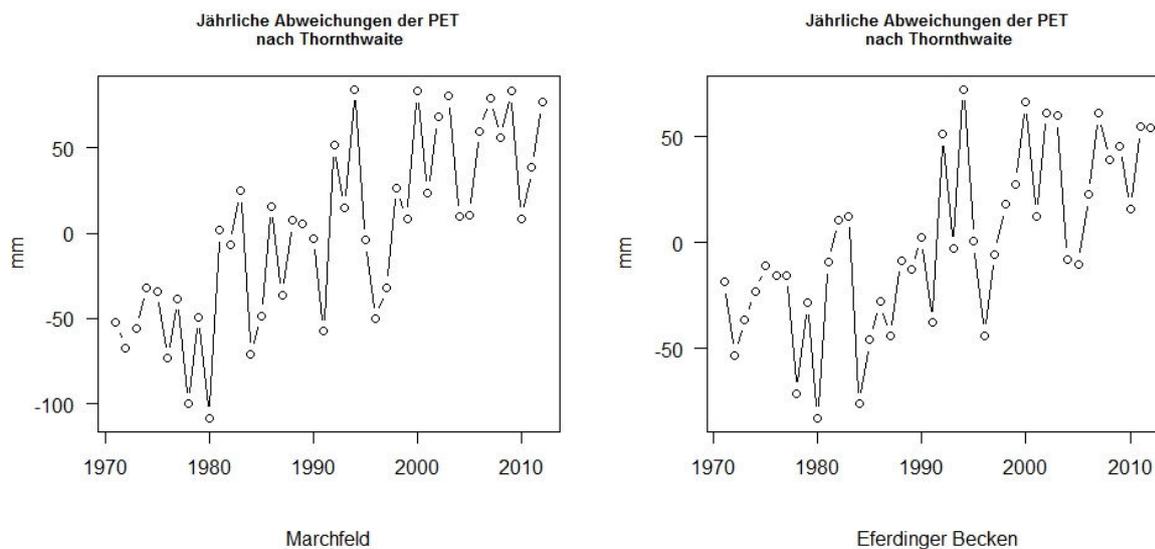


Abbildung 15 Abweichungen der Jahressummen der PET vom Durchschnitt

### 5.3.2. Berechnungen der PET für Groß-Enzersdorf nach Hargreaves

Für die Berechnung der Hargreaves-Methode werden die täglichen Maximum- und Minimum-Temperaturwerte von Groß-Enzersdorf verwendet. Ein erster Vergleich dient dazu, die unterschiedlichen Berechnungen des Hargreaves-Modells untereinander zu vergleichen. Einerseits die monatliche Berechnung der PET, andererseits die tägliche Berechnung der PET, aufsummiert auf einen Monat. Erste Ergebnisse liefert Tabelle 12. Abgebildet ist die durchschnittliche monatliche PET über den Zeitraum von 1971 bis 2012 für Groß-Enzersdorf.

	Tag	Monat
Jan	15,92	16,20
Feb	25,13	25,22
Mar	53,85	53,61
Apr	83,74	84,35
Mai	120,71	116,37
Jun	137,61	139,39
Jul	143,33	145,39
Aug	123,30	124,86
Sep	82,62	83,71
Okt	48,66	48,93
Nov	23,31	23,32
Dez	14,27	14,52
Summe	872,44	875,87

Tabelle 12 Durchschnittliche monatliche PET in mm nach Hargreaves für den Zeitraum von 1970 bis 2015; Die linke Spalte zeigt eine tägliche Berechnung der PET, die rechte Spalte eine monatliche Berechnung der PET.

Die Jahressumme der PET lässt den Schluss einer geringfügig höheren PET für die monatliche Berechnung zu. Vergleicht man die einzelnen Jahressummen der zwei Berechnungen, so schätzt die tägliche Berechnung die jährliche PET durchschnittlich um ca. 3,42 mm niedriger ein. Pro Monat liegt die durchschnittliche Abweichung bei -0,28 mm. Die Differenzen zwischen den zwei Berechnungsmethoden sind sehr gering, wobei die tägliche Berechnungsmethode eine leicht niedrigere PET schätzt als die monatliche Berechnung.

Größere Unterschiede lassen sich bei der AHC-Abschätzung erreichen. Hier wird in der Arbeit zwischen einer monatlichen (Methode „saison“) und einer durchschnittlichen Schätzung (Methode „mean“) differenziert. Die monatliche Schätzung ergibt zwölf verschiedene AHC-Werte für die Berechnung der PET. Die durchschnittliche Schätzung rechnet mit einem einzigen Wert.

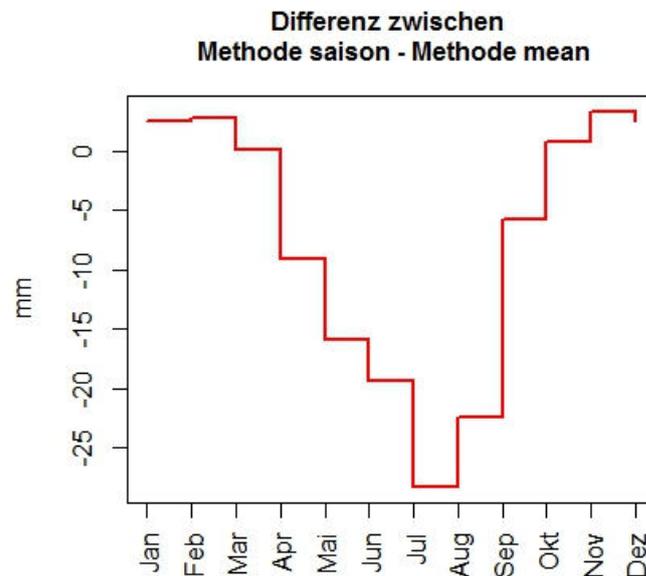


Abbildung 16 Differenz zwischen einem AHC Schätzer, und zwölf AHC-Schätzern; Die Abbildung zeigt die Differenzen der durchschnittlichen Monatssummen der PET nach Hargreaves in mm. Methode „saison“ – Methode „mean“ für den Zeitraum von 1970 bis 2015

Abbildung 16 verdeutlicht, dass bei nur einem AHC-Schätzer, die PET im Sommer wesentlich höher geschätzt wird. Die durchschnittlichen monatlichen Abweichungen betragen -7,4 mm. Betrachtet man nur den Juli, liegt die durchschnittliche Differenz bei -28,31 mm. Die Jahressummen unterscheiden sich im Durchschnitt um -89 mm. Die durchschnittlichen Jahressummen liegen bei einem AHC Schätzer bei 964,52 mm, bei zwölf AHC-Schätzern bei 875,87 mm. Die durchschnittliche gemessene Referenzverdunstung liegt im pannonischen Raum bei ca. 600 mm (Harlfinger und Knees 1999). Da die Berechnung der PET auf einer täglichen oder monatlichen Basis erfolgt, erscheint es sinnvoll für jeden Monat einen eigenen Schätzer zu generieren und nicht sämtliche Monate ident zu bewerten.

### 5.3.3. Vergleich der unterschiedlichen PET-Modelle für Groß-Enzersdorf

Ein Vergleich zwischen den zwei Modellen der Berechnung der PET ist nur mit den Daten für Groß-Enzersdorf möglich. Für das Hargreaves Modell werden zwölf AHC-Schätzer, sowie die PET auf Monatsbasis berechnet. Betrachtet man den durchschnittlichen Jahresverlauf (siehe Tabelle 13) im Zeitraum 1971 – 2012, zeigt sich, dass das Hargreaves Modell eine deutliche höhere PET berechnet. Die durchschnittliche Jahressumme ist um 214 mm höher als nach dem Thornthwaite-Modell. Vergleicht man die Entwicklung der Differenzen der Jahressummen der zwei Methoden, so wird deutlich, dass diese einem negativen Trend unterliegen. Dieser Trend ist nach dem Mann-Kendall-Test signifikant und lässt sich graphisch darstellen (siehe Abbildung 17). Der Grund für diese Veränderung liegt in der erhöhten Sensitivität des Thornthwaite-Modells auf Temperaturschwankungen.

	Hargreaves	Thornthwaite
Jan	16,2	2,66
Feb	25,22	5,98
Mar	53,61	22,54
Apr	84,35	50,5
Mai	116,37	85,85
Jun	139,39	115,82
Jul	145,39	129,21
Aug	124,86	115,96
Sep	83,71	76,19
Okt	48,93	39,33
Nov	23,32	14,41
Dez	14,52	3,21
Jahressumme	875,87	661,66

Tabelle 13 Vergleich des Hargreaves und des Thornthwaite-Modells zur Berechnung der PET; Daten sind in mm angegeben für den Zeitraum vom 1971 bis 2012

Vergleichszahlen für die beiden Modelle konnten nicht gefunden werden, allerdings führte Dobesch die Berechnungen mittels der P-M-Methode durch. Er kam für Groß-Enzersdorf von 1984 bis 1988 auf eine durchschnittliche PET von 869,8 mm (Dobesch 1993). Das Thornthwaite-Modell berechnet für diesen Zeitraum eine PET von 619,6 mm, das Hargreaves-Modell von 845,4 mm. Das Hargreaves-Modell liegt somit näher an der von der FAO anerkannten P-M-Methode.

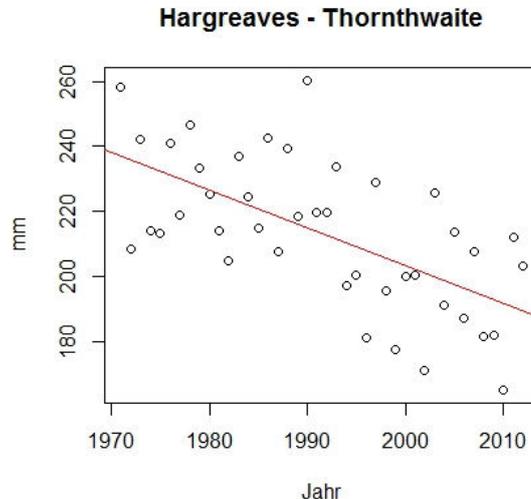


Abbildung 17 Differenzen der Jahressummen (Hargreaves - Thornthwaite) der PET über den Zeitraum von 1971 bis 2012

#### 5.4. Ergebnisse des SPEI im Marchfeld und im Eferdinger Becken

Die Ergebnisse des SPEI werden nun zuerst mit der PET nach Thornthwaite dargestellt. Der Vergleich des Thornthwaite und Hargreaves Modells in der Berechnung des SPEI erfolgt für Groß-Enzersdorf. Die PET nach Thornthwaite wird hierfür für das Eferdinger Becken und das Marchfeld mit einer Temperaturzeitreihe berechnet. Dafür wird das arithmetische Mittel über alle Stationen verwendet. Äquivalent dazu wird mit den Niederschlagsdaten verfahren.

Für die Berechnung wird die Funktion „spi\_eig“ verwendet. Als Breitengrad wird für beide Gebiete 48,3 angegeben. Bei Temperaturen unter null wird bei der Thornthwaite-Methode die PET gleich null gesetzt. Zu Beginn dieses Kapitel folgt ein Vergleich der Wasserbilanzen der beiden Untersuchungsgebiete, diese sind vom Jahresverlauf her ähnlich und differenzieren sich in der Intensität (siehe Abbildung 18).

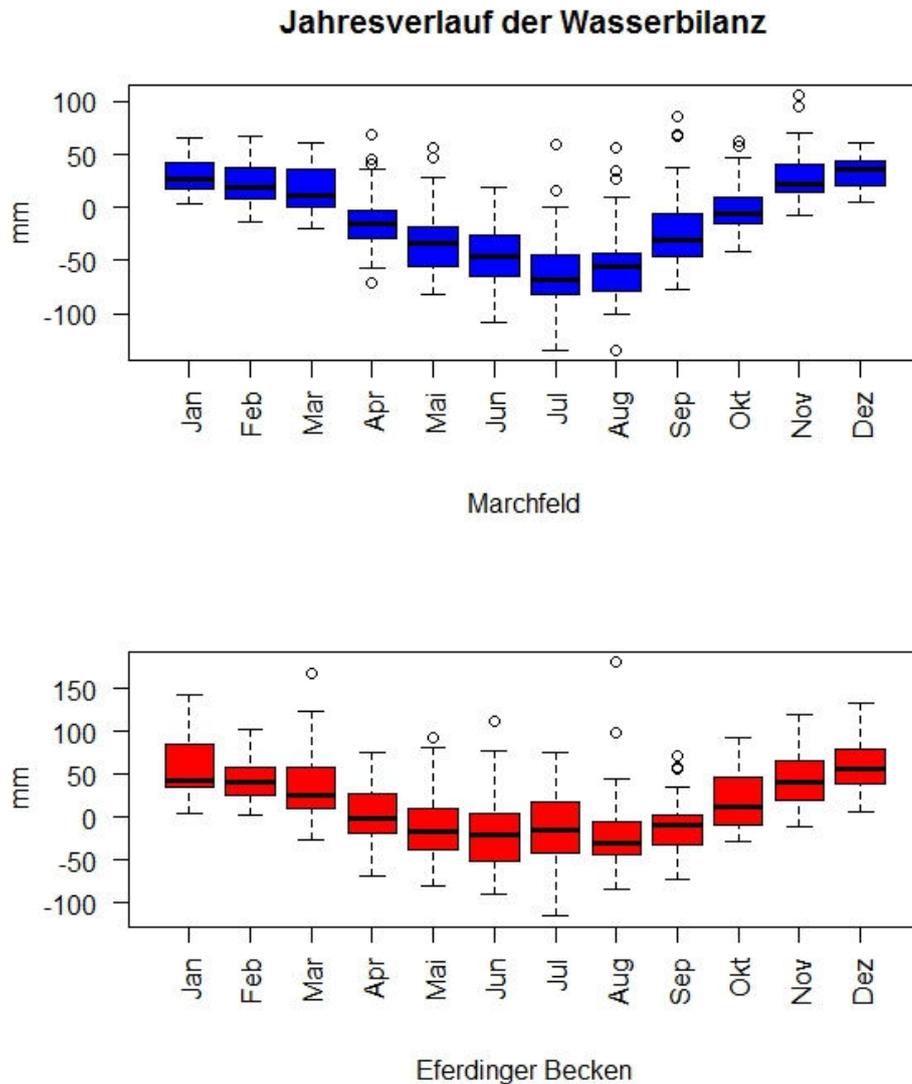


Abbildung 18 Jahresverlauf der klimatischen Wasserbilanz, Berechnung der PET nach Thornthwaite

Die Analyse der Dürreperioden erfolgt nach den gleichen Kategorien wie beim SPI. Leichte Dürreperioden treten in den beiden Untersuchungsgebieten in 31%-33% auf, gemäßigte in ca. 9 bis 13%, starke in ca. 3-6% und extreme Dürreperioden besitzen eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,5 bis 1,5 % (siehe Tabelle 14). Auffallend sind die Unterschiede der beiden Regionen beim 12- und 24-monatigen SPEI. Die Gesamtzahl der Dürreperioden ist zwar ähnlich, doch es fällt eine unterschiedliche Verteilung auf.

3 Monate				6 Monate			
Marchfeld		Eferdinger Becken		Marchfeld		Eferdinger Becken	
Anzahl	p (n=502)	Anzahl	p (n=502)	Anzahl	p (n=499)	Anzahl	p (n=499)
169	0,33665339	163	0,3247012	158	0,31663327	166	0,33266533
58	0,11553785	53	0,10557769	59	0,11823647	55	0,11022044
26	0,05179283	22	0,0438247	27	0,05410822	29	0,05811623
4	0,00796813	9	0,01792829	4	0,00801603	5	0,01002004
12 Monate				24 Monate			
Marchfeld		Eferdinger Becken		Marchfeld		Eferdinger Becken	
Anzahl	p (n=493)	Anzahl	p (n=493)	Anzahl	p (n=481)	Anzahl	p (n=481)
165	0,3346856	157	0,31845842	163	0,33887734	164	0,34095634
63	0,12778905	55	0,11156187	49	0,1018711	43	0,08939709
15	0,03042596	31	0,06288032	30	0,06237006	22	0,04573805
10	0,02028398	2	0,0040568	4	0,00831601	8	0,01663202

Tabelle 14 Anzahl und Wahrscheinlichkeiten der Dürreperioden im Marchfeld und im Eferdinger Becken

Die Anzahl der Dürreperioden nimmt im Laufe des untersuchten Zeitrahmens in beiden Gebieten (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20) zu. Insbesondere in den 1970er und 1980er Jahren treten im Marchfeld nur vereinzelt Dürren auf. Im Eferdinger Becken ist vor allem die Dürreperiode des 24-monatigen SPEI von September 1983 bis August 1984 auffallend, es wurden Werte von bis zu -2,6 generiert. Demgegenüber erreichten im Marchfeld bis zum Jahr 2000 nur zwei Dürreperioden Werte unter -2.

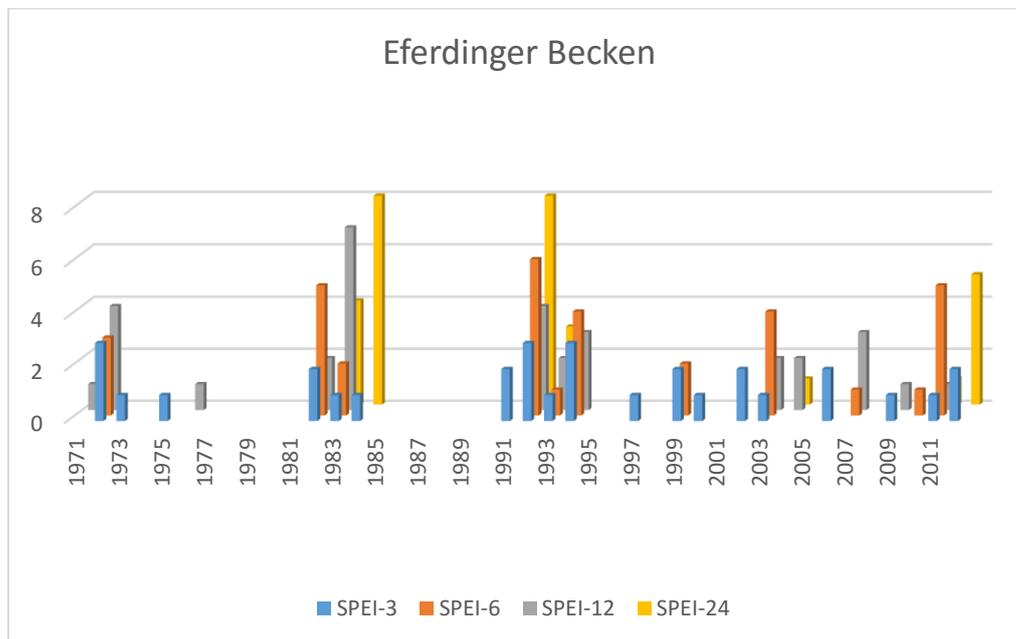


Abbildung 19 Anzahl der starken und extremen Dürreperioden von 1971-2012 im Eferdinger Becken

Im Marchfeld nimmt ab 2000 die Anzahl der Dürreperioden zu. Ein Maximalwert wird im Februar 2007 erreicht, der 6-monatige Dürreindex liegt hier bei -3,06. Die hier beobachteten SPEI-Zeitreihen sind mit der Thornthwaite Methode berechnet, möglicherweise unterliegt die Entwicklung des SPEI hier dem Trend der steigenden Evapotranspiration aufgrund zunehmender Temperaturen. Ein möglicher Trend des SPEI wurde nach Testung mittels Mann-

Kendall-Test ausgeschlossen. Ebenso wenig konnte ein Einfluss der standardisierten Temperatur auf den SPEI belegt werden.

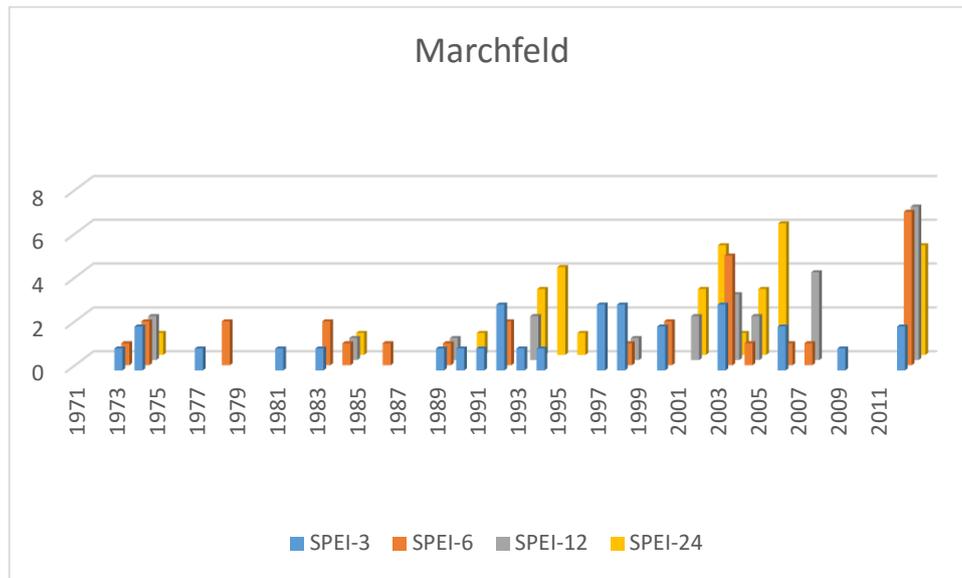


Abbildung 20 Anzahl der starken und extremen Dürreperioden von 1971-2012 im Marchfeld

Die Korrelationen zwischen den Zeitreihen der Gebiete sind in Tabelle 15 dargestellt. Die Korrelationen zwischen den Zeitreihen nehmen bei einer größer werdenden Zeitskala ab, wobei die Korrelationswerte nach Kendall 0,4 nicht überschreiten. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zurückzuführen. Zudem zeigt sich, dass der SPEI bei größeren Zeitskalen an örtlicher Repräsentanz verliert (Haslinger, Schöner, und Anders 2015).

	Kendall (tau)	Spearman (rho)	Pearson
3 Monate	0,39	0,55	0,56
6 Monate	0,36	0,52	0,53
12 Monate	0,31	0,46	0,46
24 Monate	0,24	0,36	0,36

Tabelle 15 Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Untersuchungsgebieten für alle Zeitskalen des SPEI

Wie beim SPI wird auch hier der Vierfeldertest durchgeführt. Für die Analyse werden die Resultate des SPEI binär codiert. Der 1-, 2-, 3-, 6- und 12-monatige SPEI werden untersucht. Die Ergebnisse sind ident mit jenen des SPI. Es gibt zwischen den einzelnen Untersuchungsgebieten keine signifikanten Unterschiede in den Ausprägungen.

## 5.5. Vergleich der PET-Modelle im SPEI

Für den Vergleich der zwei Berechnungsmodelle der PET für den SPEI werden die Temperaturdaten von Groß-Enzersdorf verwendet. Für den Niederschlag wird das Gebietsmittel des Marchfelds verwendet. Der SPEI wird für den Vergleich für 1, 2, 3 und 6 Monate berechnet. Korreliert man die unterschiedlichen SPEI-Ergebnisse der zwei PET-Modelle, so ergibt dies beim Spearman-Korrelationskoeffizienten für alle Zeitfenster einen Wert von 0,98. Der Kendall-Korrelationskoeffizient ist geringer und liegt bei 0,89 bis 0,87. Um

einen weiteren Vergleich zu ziehen kommt wieder der Vierfeldertest zum Einsatz. Die SPEI-Werte werden wiederum binär codiert mit dem Schwellenwert -1.

1 Monat	Thornthwaite		2 Monat	Thornthwaite	
Hargreaves	Keine Dürre	Dürre	Hargreaves	Keine Dürre	Dürre
Keine Dürre	415	7	Keine Dürre	402	18
Dürre	9	73	Dürre	13	70
3 Monat	Thornthwaite		6 Monat	Thornthwaite	
Hargreaves	Keine Dürre	Dürre	Hargreaves	Keine Dürre	Dürre
Keine Dürre	398	10	Keine Dürre	397	19
Dürre	18	76	Dürre	9	74

Tabelle 16 Darstellung aller Vierfeldertafeln für den Vergleich des SPEI mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden. Die gewählten Zeitfenster sind hier 1,2,3 und 6 Monate.

Auffallend ist bei den Vierfeldertafeln (siehe Tabelle 16), dass nur in wenigen Fällen keine Übereinstimmung erzielt wird. Betrachtet man die AUC, so erhält man Werte von 0,92 für den 1- und 6-monatigen SPEI, 0,9 beim 2-monatigen SPEI und wie auch schon anhand der Vierfeldertafel ablesbar ist, erreicht der 3-monatige SPEI den geringsten Wert mit 0,89. Betrachtet man die Differenzen zwischen den einzelnen Berechnungsmethoden, so ergibt sich nach Mann-Kendall ein negativer Trend, welcher mit der Größe des Zeitfensters zunimmt (siehe dazu Abbildung 21).

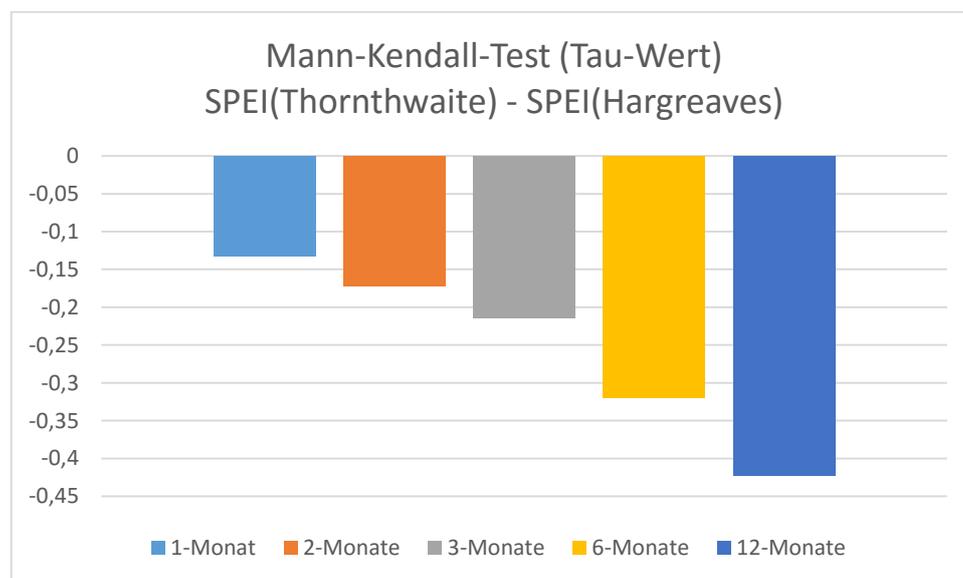


Abbildung 21 Mann-Kendall-Trend-Test für die Differenzen zwischen dem SPEI mittels PET Berechnung nach Thornthwaite und SPEI mittels PET Berechnung nach Hargreaves. Der negative Trend nimmt dabei mit zunehmendem Zeitfenster zu.

## 5.6. Vergleich SPEI und SPI

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse des SPI und des SPEI im Marchfeld und im Eferdinger Becken verglichen. Betrachtet man die Verteilungen der beiden Indizes, so lassen sich nur geringe Differenzen erkennen. Deutlicher werden diese, wenn man die beiden Zeitreihen korreliert. Wie schon zuvor gezeigt, verringert sich die Korrelation der beiden

Indizes mit der Länge des Zeitfensters (siehe Tabelle 17). Diese abnehmende Korrelation zwischen den beiden Indizes wurde bereits von Vicente-Serrano, Beguería, und López-Moreno 2010 festgestellt.

Marchfeld			
	Pearson	Spearman	Kendall
3 Monate	0,92	0,92	0,75
6 Monate	0,89	0,88	0,71
12 Monate	0,82	0,81	0,62
24 Monate	0,7	0,68	0,48
Eferdinger Becken			
3 Monate	0,97	0,97	0,85
6 Monate	0,95	0,95	0,8
12 Monate	0,91	0,91	0,74
24 Monate	0,86	0,84	0,65

Tabelle 17 Korrelation zwischen SPI und SPEI

Das Auftreten der Dürreperioden (siehe dazu Tabelle 18 und Tabelle 19) verläuft bei den beiden Dürreindizes gegenläufig. Beim SPI treten die Dürreperioden eher in den ersten 20 Jahren des Untersuchungszeitrahmens auf – im Eferdinger Becken ist dieser Trend nicht signifikant - niedrige Werte des SPEI treten vermehrt ab den 1990er Jahren auf. Beim SPEI ist dies auf eine Zunahme der Evapotranspiration und geringe Schwankungen des Niederschlags zurückzuführen. Beim SPI im Marchfeld konnte ein negativer Trend nachgewiesen werden, der auf den positiven Niederschlagstrend zurückzuführen ist (siehe dazu Kapitel 5.2).

Eferdinger Becken				
	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2012
3 Monate				
SPEI	0,161	0,129	0,419	0,290
SPI	0,243	0,243	0,351	0,162
6 Monate				
SPEI	0,088	0,206	0,382	0,324
SPI	0,143	0,343	0,343	0,171
12 Monate				
SPEI	0,182	0,273	0,273	0,273
SPI	0,438	0,344	0,188	0,031
24 Monate				
SPEI	0,000	0,387	0,387	0,226
SPI	0,250	0,472	0,278	0,000

Tabelle 18 Prozentueller Anteil der Dürreperioden ( $< -1,5$ ) im Eferdinger Becken

Marchfeld				
	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2012
3 Monate				
SPEI	0,133	0,133	0,467	0,267
SPI	0,406	0,219	0,281	0,094
6 Monate				
SPEI	0,167	0,167	0,167	0,500
SPI	0,629	0,229	0,086	0,057
12 Monate				
SPEI	0,080	0,080	0,120	0,720

SPI	0,700	0,100	0,000	0,200
24 Monate				
SPEI	0,029	0,059	0,235	0,676
SPI	1,000	0,000	0,000	0,000

Tabelle 19 Prozentueller Anteil der Dürreperioden ( $< -1,5$ ) im Marchfeld

Betrachtet man nur die 3-monatigen Dürreperioden, ergeben sich im Eferdinger Becken nur geringe Unterschiede. Im Marchfeld werden einige Dürreperioden in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums vom SPI nicht erkannt (Tabelle 21 und Tabelle 22 zeigen den Vergleich zwischen dem 3-monatigen SPI und SPEI in beiden Untersuchungsgebieten). Dies trifft ebenso auf den SPEI in den ersten 20 Jahren des Untersuchungszeitraums zu. Schränkt man den Zeitraum auf die Vegetationsperiode (März bis September) ein, treten die Dürreereignisse bei allen Zeitfenstern in einem Rhythmus von ca. 14 Jahren auf.

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass das Eferdinger Becken stärker von Niederschlag beeinflusst ist und die Dürreperioden im Marchfeld eher Temperatur, beziehungsweise durch die Evapotranspiration gesteuert sind. Dies legen auch Studien nahe, die bei höheren durchschnittlichen Niederschlagssummen eine Sensitivität des SPEI auf den Niederschlag entdeckt haben, gleiches gilt für den Effekt der Evapotranspiration (Beguería u. a. 2014). Dies zeigt sich vor allem an der Entwicklung der Dürreperioden des SPEI im Marchfeld, die im Eferdinger Becken noch gleichmäßiger über die Jahrzehnte verteilt sind. Allerdings lässt sich nur für die PET ein signifikanter Trend erkennen, für den Niederschlag trifft dies nicht zu (Spinoni u. a. 2015).

Eferdinger Becken					
1 Monat	SPI		2 Monate	SPEI	
	Keine Dürre	Dürre		Keine Dürre	Dürre
Keine Dürre	412	14	Keine Dürre	411	13
Dürre	8	70	Dürre	10	69
3 Monate	SPI		6 Monate	SPEI	
	Keine Dürre	Dürre		Keine Dürre	Dürre
Keine Dürre	409	15	Keine Dürre	377	27
Dürre	9	69	Dürre	28	61
Marchfeld					
1 Monat	SPI		2 Monate	SPEI	
	Keine Dürre	Dürre		Keine Dürre	Dürre
Keine Dürre	402	24	Keine Dürre	389	27
Dürre	22	56	Dürre	26	61
3 Monate	SPI		6 Monate	SPEI	
	Keine Dürre	Dürre		Keine Dürre	Dürre
Keine Dürre	391	29	Keine Dürre	388	30
Dürre	23	59	Dürre	21	60

Tabelle 20 Vierfeldertafel für den Vergleich zwischen SPI und SPEI in den beiden Untersuchungsgebieten. Die ausgewählten Zeitfenster der beiden Indizes sind hier 1,2,3 und 6 Monate

Vergleicht man die Vierfeldertafeln (siehe Tabelle 20) für den SPI und den SPEI in den beiden Untersuchungsgebieten, so fällt der schwächere Zusammenhang im Marchfeld zwischen den zwei Indizes auf. Außerdem nehmen die Übereinstimmungen zwischen SPI und SPEI bei größeren Zeitfenstern ab. Dies verdeutlicht auch die Analyse der AUC (siehe Abbildung 22). Diese schlechtere Übereinstimmung im Marchfeld ist einerseits darauf zurückzuführen, dass

im Marchfeld ein signifikanter Niederschlagstrend beobachtet werden konnte. Dieser Trend spiegelt sich auch im SPI wider, zeigte sich aber beim SPEI nicht. Außerdem sind die durchschnittlichen Temperaturen im Marchfeld um beinahe 1°C (siehe dazu Kapitel 3) höher als im Eferdinger Becken. Der SPEI im Marchfeld ist somit mehr sensitiv auf die PET als im Eferdinger Becken, welches eine größere Abhängigkeit vom Niederschlag zeigt.

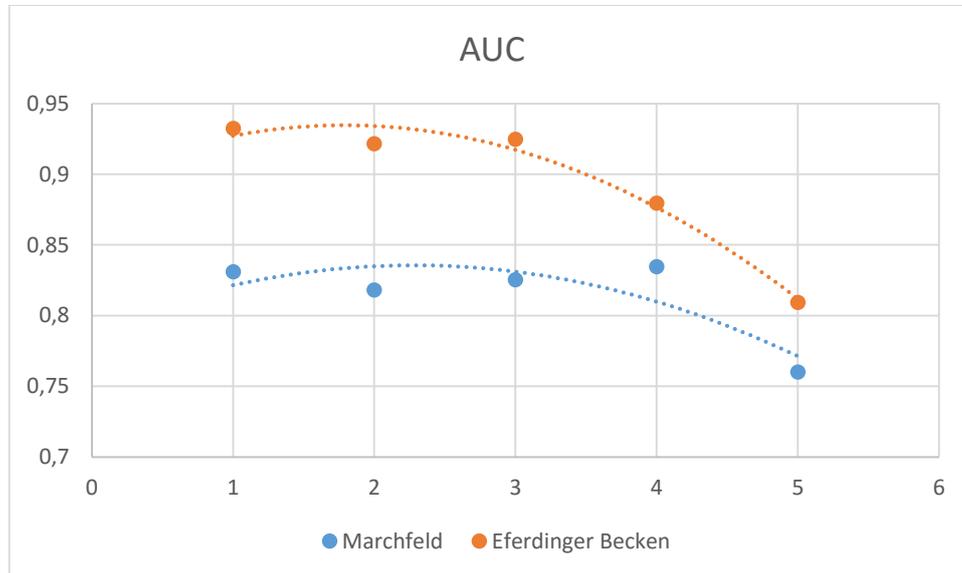


Abbildung 22 AUC Werte für das Marchfeld und das Eferdinger Becken für den Vergleich zwischen SPI und SPEI. Die x-Achse beschreibt die gewählten Zeitfenster: 1 = 1 Monat, 2 = 2 Monate, 3 = 3 Monate, 4 = 6 Monate, 5 = 12 Monate.

Eferding					
SPI - 3			SPEI - 3		
Monat	Jahr	Indizes	Monat	Jahr	Indizes
3	1971	-2	1	1972	-1,619
1	1972	-1,64	2	1972	-2,033
2	1 972	-2,5	3	1972	-1,932
3	1972	-2,28	2	1973	-1,635
2	1973	-1,96	11	1975	-1,741
9	1973	-1,6	9	1982	-1,647
11	1975	-1,67	11	1982	-2,041
4	1976	-2,15	9	1983	-1,791
6	1976	-1,92	12	1984	-2,08
4	1982	-1,53	10	1991	-2,097
9	1982	-1,92	11	1991	-1,521
11	1982	-1,91	6	1992	-1,65
9	1983	-2,19	7	1992	-2,185
8	1984	-1,53	8	1992	-1,733
12	1984	-2,16	5	1993	-2,035
8	1986	-1,58	7	1994	-2,109
9	1986	-1,81	8	1994	-2,233
1	1990	-1,64	9	1994	-1,875
2	1991	-1,62	1	1997	-1,567
10	1991	-2,16	10	1999	-2,146
11	1991	-1,63	11	1999	-1,752
6	1992	-2,21	6	2000	-1,604
7	1992	-2,7	6	2002	-1,801
5	1993	-2,02	7	2002	-1,555
7	1994	-2,41	5	2003	-1,797
8	1994	-2,27	11	2006	-1,566
9	1994	-1,95	12	2006	-1,77
3	1996	-1,93	1	2009	-1,634
1	1997	-1,67	4	2011	-1,721
10	1999	-1,86	4	2012	-1,511
11	1999	-1,59	5	2012	-1,937
6	2002	-1,98			
4	2003	-1,84			
5	2003	-1,77			
1	2009	-1,62			
4	2011	-1,65			
5	2012	-1,67			

Tabelle 21 Schwere und extreme Dürren im Eferdinger Becken, Vergleich zwischen SPI und SPEI

Marchfeld					
SPI - 3			SPEI - 3		
Monat	Jahr	Indizes	Monat	Jahr	Indizes
6	1971	-1,5	1	1973	-1,506
7	1971	-2	4	1974	-1,937
8	1971	-1,54	5	1974	-1,545
11	1972	-1,95	12	1977	-1,666
12	1972	-2,01	2	1981	-1,526
1	1973	-1,74	9	1983	-1,742
7	1973	-1,59	3	1989	-2,297
4	1974	-2,34	1	1990	-1,764
5	1974	-2,58	10	1991	-1,576
6	1977	-1,89	8	1992	-1,578
11	1977	-1,73	9	1992	-1,948
12	1977	-1,88	10	1992	-1,843
1	1978	-1,57	5	1993	-1,917
2	1981	-2,07	3	1994	-1,525
4	1982	-2,11	1	1997	-1,624
9	1983	-1,82	2	1997	-1,574
12	1983	-1,54	10	1997	-1,724
5	1986	-1,52	2	1998	-1,855
3	1989	-2,12	3	1998	-1,739
1	1990	-2,37	4	1998	-1,707
3	1991	-1,77	6	2000	-2,116
10	1991	-1,54	7	2000	-1,542
9	1992	-1,74	4	2003	-1,599
5	1993	-2,06	8	2003	-1,955
1	1997	-1,59	10	2003	-1,801
2	1997	-1,82	11	2006	-2,545
10	1997	-1,95	12	2006	-2,073
3	1998	-1,63	10	2009	-1,664
6	2000	-2,19	5	2012	-1,759
4	2003	-2,22	6	2012	-1,51
11	2006	-1,74			
12	2011	-1,54			

Tabelle 22 Schwere und extreme Dürren im Marchfeld, Vergleich zwischen SPI und SPEI

## 5.7. Ergebnisse Erntemodell

Die Auswahl der Ackerfrüchte erfolgt nach der Vollständigkeit der Daten. Zuerst werden die Zeitreihen auf Ausreißer geprüft. In Gänserndorf ist dies im Jahr 1987 bei den Frühkartoffeln der Fall. In Eferding und Urfahr 1985 beim Wintergetreide und in Eferding beim Klee, sowie 1995 in Eferding beim Sommergetreide und bei der Wintergerste und 1988 bei der Sommergerste. In Urfahr ist die Ernte des Hafers im Jahr 1986 ein Ausreißer. Unter nicht Beachtung der Ausreißer wird eine lineare Regression zwischen den Erträgen auf Bezirks und Landesebene berechnet. Das Gütekriterium für diese Regression wird mit einem korrigierten  $R^2$  von 0,8 bestimmt (Übersicht über das Bestimmtheitsmaß, siehe Tabelle 23). Im Fall der Sommergerste in Eferding wird aufgerundet, um von der Sommergerste Informationen aus allen drei Bezirken zu haben.

adjusted R <sup>2</sup>	Gänserndorf	Eferding	Urfahr- Umgebung
Wintergetreide	0,2703	0,683	0,8511
Sommergetreide	0,4507	0,5462	0,759
Hafer	0,7175	0,838	0,9475
Wintergerste	0,9081	0,9738	0,9461
Sommergerste	0,9092	0,7978	0,8993
Frühkartoffeln	0,7815	0,8305	0,7054
Spätkartoffeln	0,8262	0,9166	0,3392
Zuckerrüben	0,9736	0,9032	0,3986
Futterrüben	0,3566	0,5279	0
Klee	0,1983	0,4163	0,4677

Tabelle 23 Regressionsmodell zum Schätzen der fehlenden Werte, die ausgewählten Modelle sind grün markiert

In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind Beispiele für das Regressionsmodell mit Konfidenzintervall abgebildet. Mittels der Regressionskoeffizienten werden im nächsten Schritt die fehlenden Werte in den einzelnen Bezirken extrapoliert.

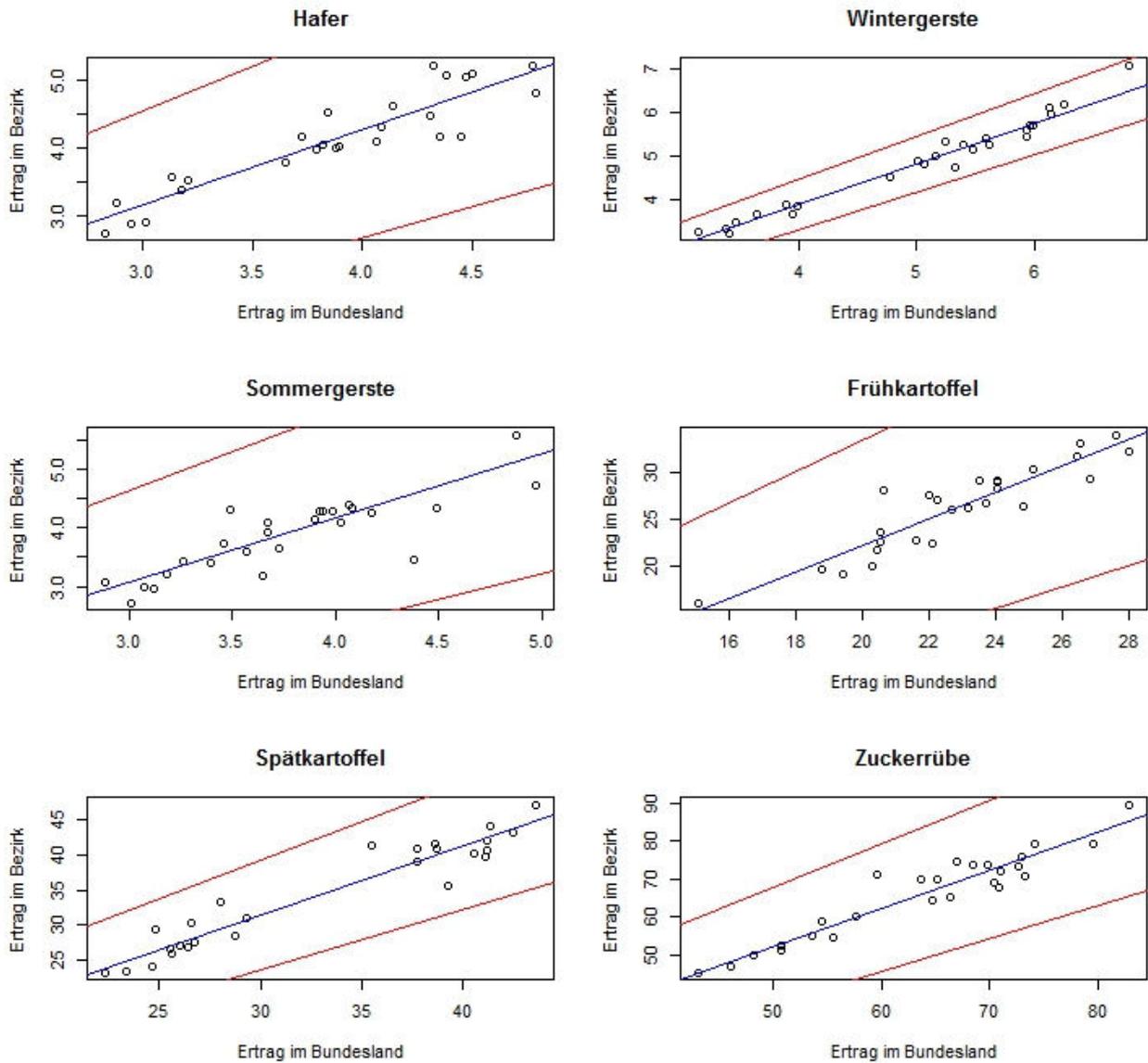


Abbildung 23 Regressionsmodelle Eferding, Erträge in t/ha von 1971 bis 2015

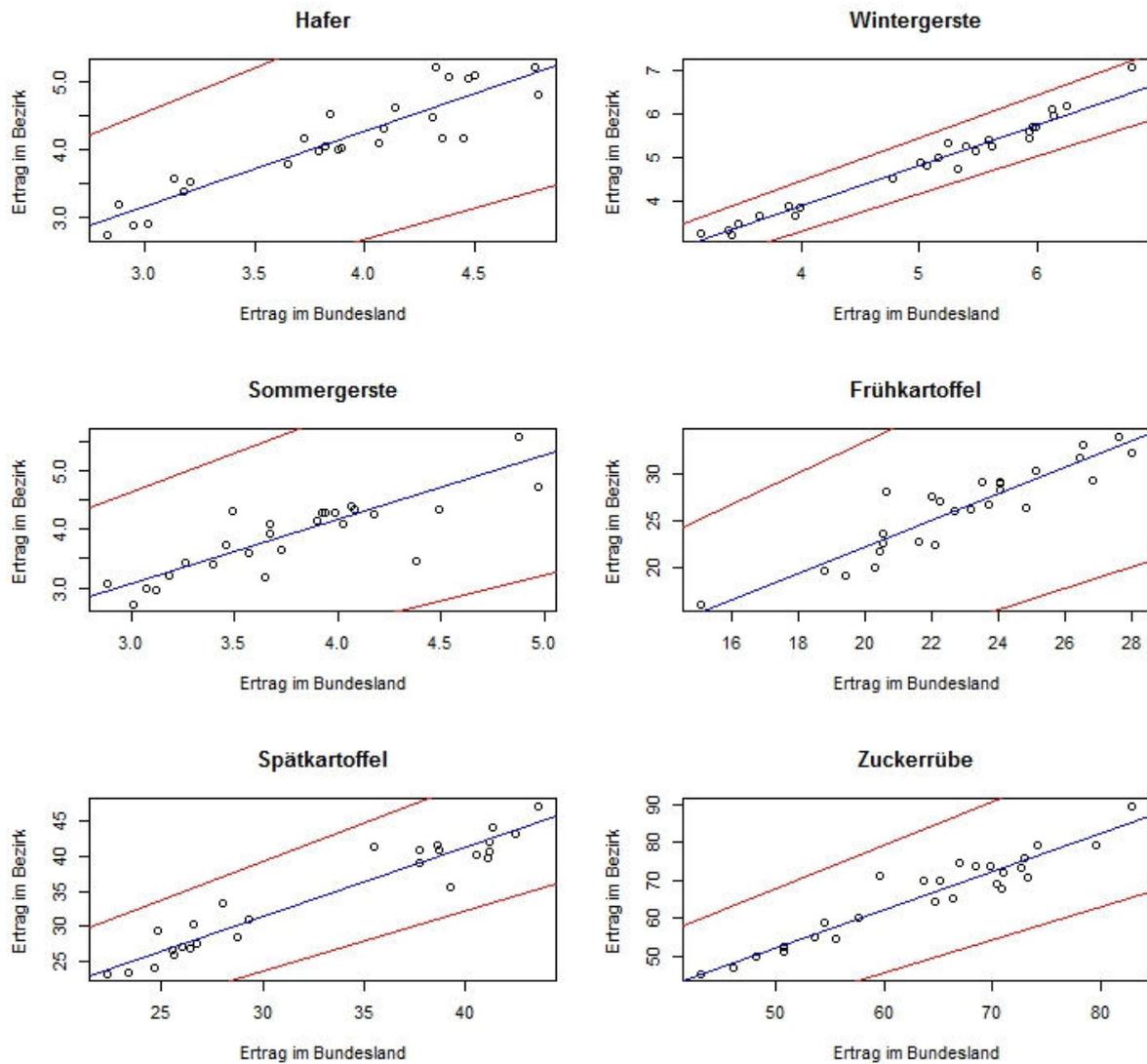


Abbildung 24 Regressionsmodelle Marchfeld, Erträge in t/ha von 1971 bis 2015

Im nächsten Schritt werden die Erntedaten von ihrem Trend bereinigt. Die Erträge steigen seit den 1970er Jahren. Für die Analyse der Auswirkungen von Dürreperioden auf die Ernteerträge müssen Anomalien berechnet werden (Potop 2011; Potop, Možný, und Soukup 2012). Dazu wird ein Polynom an die Zeitreihe der Erträge angepasst. In Abbildung 25 sind die Polynome der Sommergerste für die drei Bezirke dargestellt. Der Zusammenhang zwischen den Ernteerträgen in Eferding und in Urfahr ist im Übrigen signifikant, mit einem Korrelationskoeffizienten nach Spearman von 0,87. Wie aus den Polynomen hervorgeht, ist die Anpassung mit einem  $R^2$  von 0,3 bis 0,54 relativ gering. Grundsätzlich lassen sich für alle Erträge bestimmte Muster erkennen. Bis zum Jahr 1990 steigen die Erträge an. Ab diesem Zeitpunkt stagnieren die Ernteerträge, mit einem leichten Anstieg ab dem Jahr 2010. Ähnliche Ergebnisse erzielte auch Potop 2011.

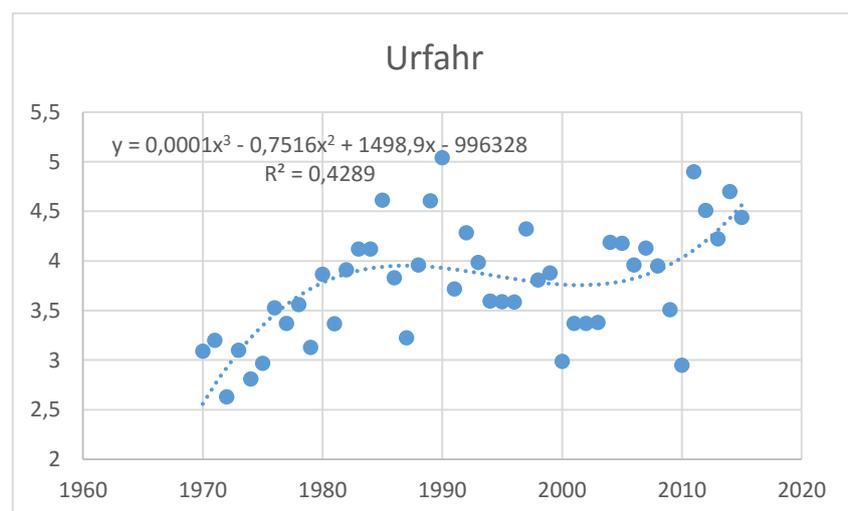
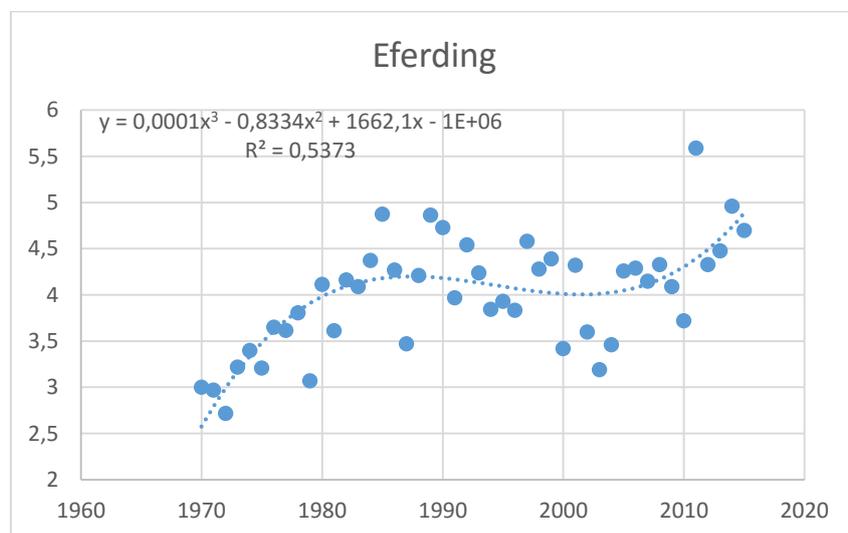
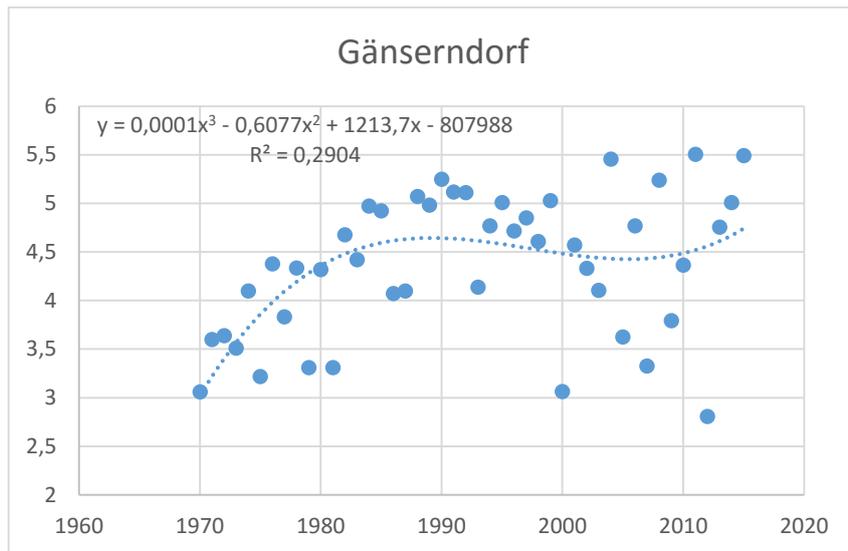


Abbildung 25 Polynomannpassung an die Ernteerträge der Sommergerste in den Bezirken Gänserndorf, Eferding und Urfahr

Der letzte Schritt ist die Standardisierung der Ernteerträge. Negative Werte deuten auf geringe Ernteerträge und mögliche Auswirkungen von Dürreperioden hin (siehe Abbildung 26). Diesen Zusammenhang zu überprüfen, ist Teil des nächsten Kapitels.

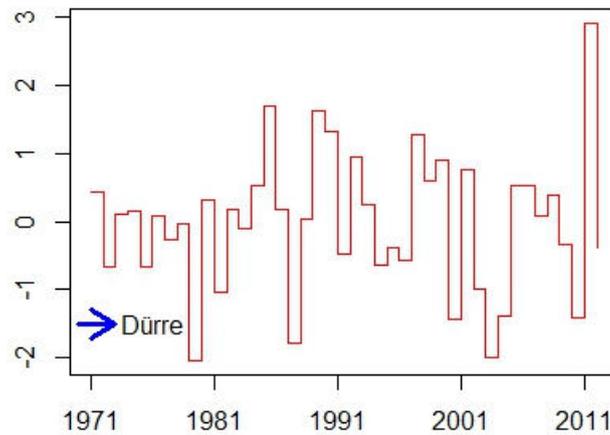


Abbildung 26 Standardisierte Ernteerträge der Sommergerste in Eferding

## 5.8. Evaluierung der Dürreindizes anhand der Ernteanomalien

In diesem Kapitel sollen nun die Ergebnisse des vorgegangenen Kapitels zusammengeführt werden. Eingangs wurde die These formuliert, dass Anomalien der Ernteerträge mit Hilfe von Dürreindizes beschrieben werden können. Um dies zu erreichen wurde eine Modellsimulation durchgeführt, um das multiple Regressionsmodell mit dem höchsten  $R^2$  zu finden. Das Modell nimmt alle Monate eines Jahres zur Berechnung. Auffällig ist, dass teilweise die Monate Jänner und Februar zur Erklärung beitragen, obwohl in diesen Monaten keine Vegetation herrscht. Die Vegetationszeit wird mit einer Dauer von März bis Oktober angenommen (Neugebauer 2013). Signifikante Ergebnisse (Darstellung der Ergebnisse, siehe Tabelle 24) können nur für die Sommergerste im Eferdinger Becken und für die Zuckerrübe im Marchfeld erzielt werden. Bei der Zuckerrübe zeigt sich im Modell, dass mit April und Mai vor allem die ersten Monate der Vegetationsperiode entscheidend sind (S. Thaler u. a. 2012).

Modellauswahl	SPI	adj $R^2$	SPEI	adj $R^2$
	Monate		Monate	
Wintergerste (Marchfeld)		0,087		0,206
Sommergerste (Marchfeld)		0,132		0,235
Zuckerrübe (Marchfeld)	Jan, Aug	0,307	Jan, Apr, Mai, Jul, Okt	0,514
Spätkartoffel (Marchfeld)		0,164	Jan, Mär, Jun, Aug - Dez	0,318
Hafer (Eferding)		0,014		0,007
Wintergerste (Eferding)		0,252		0,177
Sommergerste (Eferding)	Jan, Feb, Mai, Aug-Dez	0,354		0,287
Frühkartoffeln (Eferding)		0,029		0,02
Spätkartoffeln (Eferding)	Feb, Mär, Jun, Jul, Sep, Okt, Dez	0,39	Mär, Jun, Jul, Sep, Okt, Dez	0,329

Zuckerrübe (Eferding)		0,289	Mär, Apr, Mai	0,308
Wintergetreide (Urfahr)		0,061		0,034
Hafer (Urfahr)	Feb-Aug, Okt, Nov	0,316		0,178
Wintergerste (Urfahr)		0,228		0,153
Sommergerste (Urfahr)	Jan, Apr, Mai, Jun, Aug, Okt, Nov	0,389	Jan, Apr, Mai, Jun, Aug, Okt, Nov	0,314

*Tabelle 24 Modellauswahl, bei  $R^2$  von größer als 0,3 mit ausgewählten Monaten. Die angegebenen Monate sind jene, die das beste Modell für die jeweiligen Ernteanomalien liefern. Angegeben sind nur jene in denen das  $R^2$  größer als 0,3 ist. Verwendet wurde der 3-monatige SPI und SPEI.*

Grundsätzlich sind die Werte des  $R^2$  nicht abweichend von den Untersuchungen von (Potop 2011; Potop, Možný, und Soukup 2012; Neuwirth und Hofer 2013). Im Marchfeld wird bei den Analysen deutlich, dass der SPEI besser als Prädiktor wirkt, als der SPI. Dies ist im Eferdinger Becken nicht der Fall. Als Ursache dafür wird die höhere Niederschlagsabhängigkeit des Eferdinger Beckens angenommen, im Vergleich zum Marchfeld, wo Dürreperioden eher temperaturgesteuert sind. Außerdem wird dort großflächig bewässert, wofür jedoch keine Daten zur Verfügung stehen (Neugebauer 2013). Für diese erste Analyse wurden der 1-, 2-, 3- und 6-monatige SPI bzw. SPEI verwendet. Dargestellt sind an dieser Stelle nur der 3-monatige SPI und SPEI, da diese die besten Ergebnisse liefern.

Eine weitere Möglichkeit den Zusammenhang zwischen den Anomalien und den Indizes zu untersuchen, ist die Korrelation des durchschnittlichen Wertes der Indizes in der Vegetationsphase und den jährlichen Ernteanomalien. Die Ergebnisse (siehe Tabelle 25) ähneln jenen der Modelluntersuchungen. Auffallend ist erneut der Vorteil der besseren Beschreibung der Ernteanomalien mittels des SPEI im Marchfeld gegenüber dem SPI. Im Eferdinger Becken ist hingegen der SPI ein besserer Indikator für die Ernteanomalien

	SPI		SPEI	
	Spearman	Kendall	Spearman	Kendall
Marchfeld				
Wintergerste	0,191	0,122	0,235	0,173
Sommergerste	0,111	0,085	0,22	0,141
Spätkartoffeln	0,016	0,013	0,022	0,003
Zuckerrüben	0,543	0,38	0,54	0,37
Eferding				
Hafer	-0,04	-0,027	0,028	0,022
Wintergerste	-0,274	-0,194	-0,228	-0,159
Sommergerste	-0,165	-0,115	-0,147	-0,117
Frühkartoffeln	0,052	0,031	0,044	0,024
Spätkartoffeln	-0,108	-0,087	-0,18	-0,136
Zuckerrüben	-0,226	-0,161	-0,289	-0,224
Urfahr				
Wintergetreide	-0,102	-0,064	0	0,003
Hafer	-0,148	-0,127	-0,072	-0,064
Wintergerste	-0,13	-0,094	-0,079	-0,041
Sommergerste	-0,309	-0,194	-0,32	-0,22

*Tabelle 25 Korrelation der Mittelwerte der 3-monatigen Dürreindizes aus der Vegetationsphase (März bis Oktober) mit den Ernteanomalien*

Für einige der hier untersuchten Pflanzen sind neben den Dürreereignisse in der Vegetationsperiode, auch die Temperaturen im Winter davor wichtige Faktoren. Für Ackerfrüchte wie die Wintergerste, oder das Wintergetreide ist eine Frostperiode entscheidend, um im Frühjahr die Vernalisation starten zu können (Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs und Gesellschaft für Pflanzenzüchtung 2013; S. Thaler u. a. 2012). Für diese Sorten würden tägliche Minimaltemperaturen vermutlich zu einem höheren Erklärungsgrad beitragen. Um die Aufnahme zusätzlicher Variablen zu vermeiden, beschränken sich die folgenden Analysen auf die Sommergerste. Die Sommergerste ist das einzige Modell, welches für alle drei Bezirke vorhanden ist. Hier werden nun noch die Modellversuche, reduziert auf die Vegetationsperiode, dargestellt. Verwendet wird hier einerseits der 3-monatige SPEI für das Marchfeld und für Urfahr, sowie der 3-monatige SPI für das Eferdinger Becken. Für Eferding kann hier ein maximales  $R^2$  von 0,09, für Urfahr von 0,13 und für das Marchfeld von 0,18 erzielt werden. Um die iterativen Schritte der Modellauswahl zu verdeutlichen, sieht man in Abbildung 27 die Auswahl der Monate je nach Modellgröße.

Mittels dieses Modells können nur wenige Aussagen über die Genauigkeit des SPI und des SPEI getroffen werden. Viele mikroskalige Faktoren wie Bodenbearbeitung, Düngung oder Bewässerung können die Produktion der Ernte beeinträchtigen. Außerdem bedeutet ein positiver SPI oder SPEI nicht bedingt erhöhte Ernteerträge, wie es in dem multiplen linearen Modell impliziert wird. Ein möglicher Ansatz wäre nicht die Anomalien der Ernten zu betrachten, sondern die Dürren eindeutig zu bestimmen, um so die Dürreindizes besser evaluieren zu können. Lesk (Lesk, Rowhani, und Ramankutty 2016) verwendete hierfür eine Datenbank ([http://www.emdat.be/country\\_profile/index.html](http://www.emdat.be/country_profile/index.html)), da Kältewellen oder Überschwemmungen im Dürreindex nicht abgebildet werden. Diese Datenbank ist für Österreich aber unzureichend, da keine einzige Dürre verzeichnet ist, sondern nur eine Hitzewelle, jene aus dem Jahr 2003 (Rebetez u. a. 2006). Hilfreicher ist eine europäische Datenbank (Blauhut, Gudmundsson, und Stahl 2015) (<http://www.geo.uio.no/edc/droughtdb>). Sie listet jedoch in erster Linie bereits bekannte Dürreperioden auf.

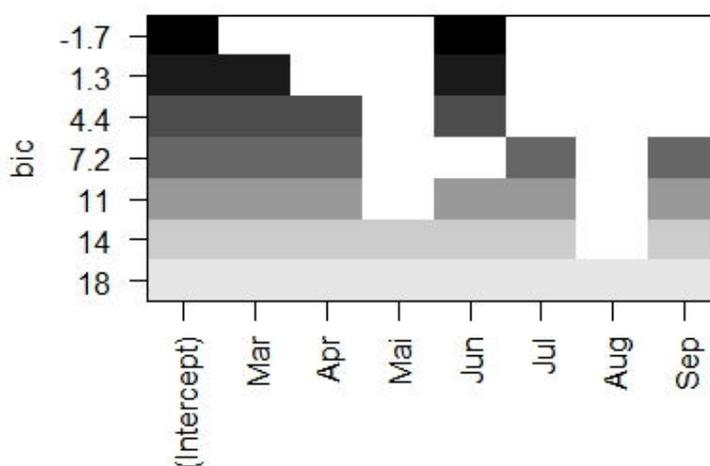


Abbildung 27 Modellauswahl mittels des Befehls regsubstet in R; die Blöcke deuten die Auswahl der einzelnen Monate für jede Stufe des Modells an.

Die Datenbank liefert Informationen zu zwei Dürreperioden im Jahr 2003 (Rebetez u. a. 2006) und 2012 ([http://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wirtschaft/oesterreich/469946\\_Grosse-](http://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wirtschaft/oesterreich/469946_Grosse-)

[Ernteausfaelle-in-der-Kornkammer-Oesterreichs.html](#)). Die Ergebnisse der Ernteanomalien zeugen davon, dass die Dürreperiode im Jahr 2012 nur im Marchfeld Auswirkungen auf die Landwirtschaft hatte. Im Eferdinger Becken sind die Ernteeinbußen wesentlich geringer. Die Indizes zeigen im Marchfeld Dürreperioden (Werte von  $< -1$ ) von April bis Juni an, der 3-monatige SPEI sogar bis August. Im Eferdinger Becken hingegen sind nur im April und im Mai Werte kleiner  $-1$  erkennbar, die restlichen Monate bewegen sich wieder um den Median von 0. Zusätzlich zur Dürre wurden viele Pflanzen durch Spätfrost im Mai 2012 geschädigt (Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs und Gesellschaft für Pflanzenzüchtung 2013). Im Jahr 2003 sind die Verminderungen der Ernte in beiden Untersuchungsgebieten auffällig, betroffen davon sind Winter- und Sommergerste und Wintergetreide. Der 3-monatige SPEI im Marchfeld zeigt eine Dürre von April bis Oktober, der 3-monatige SPI im März und April, sowie von August bis September. Im Eferdinger Becken ist die Dürreperiode des SPEI ebenso deutlich von April bis September mit einem Wert von  $-0,7$  im Juli. Der SPI hat negative Werte von März bis Dezember, mit schweren Dürren im April und Mai, sowie einer Dürre von  $-1,1$  im September. Die Beispiele der Jahre 2003 und 2012 zeigen, dass Dürreperioden, welche eindeutig zugewiesen werden können, von den Indizes erkannt werden. Sind Ernteanomalien somit eindeutig Dürreperioden zuzuordnen, sind diese in den Dürreindizes feststellbar.

Aus diesem Grund wird ein weiteres statistisches Modell getestet, Ernteanomalien eindeutig als landwirtschaftliche Dürreereignisse zu erkennen. Unter der Annahme, dass Dürren Extremereignisse sind, muss es deutliche Ernteminderungen geben. Die Ernteanomalien werden in ein binäres System überführt. 0 bedeutet keine Dürre, 1 ist gleich Dürre. Der Schwellenwert wird mit dem 10%-Perzentil festgelegt. Mittels dieses Modells soll nun festgestellt werden wie exakt die Indizes Dürren voraussagen, beziehungsweise wie oft Dürren prognostiziert werden, welche keine sind. Der Prädiktor ist in diesem Fall der Durchschnitt ausgesuchter Monate des 3-monatigen SPEI des Marchfelds. In einer iterativen Suche konnten die besten Ergebnisse für den Zeitraum Juli bis September bestimmt werden. Berechnet man den Durchschnitt des 3-monatigen SPEI für diesen Zeitraum, so erhält man einen AUC-Wert (Area under the curve) von 0,85 (Abbildung 28).

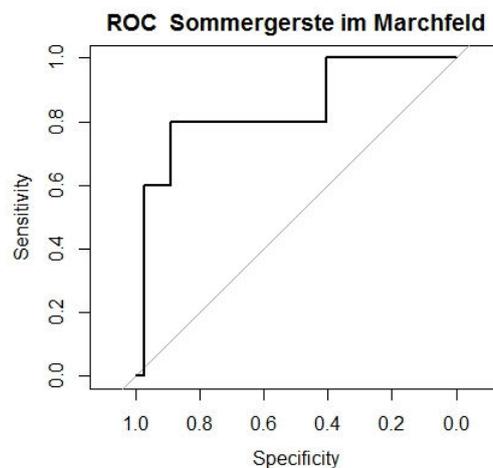


Abbildung 28 ROC der Sommergerste im Marchfeld und des durchschnittlichen SPEI von Juli bis September

Einen weiteren Schritt stellt die Verwendung aller Zeitfenster des SPI beziehungsweise des SPEI dar. Hierfür werden die binär-codierten Daten verwendet, welche 0 bei Indizes-Werten von  $> -1$  angeben und 1 bei Werten  $< -1$ . Diese Codierung wurde bereits in den Vergleichen der

Untersuchungsgebiete, der Dürreindizes untereinander, sowie bei der Analyse des Einflusses der PET-Berechnung auf den SPEI verwendet. Der 1-, 2-, 3-, und 6-monatige SPI und SPEI werden nach dieser Methode binär codiert. In dieser Folge wird für jede jährliche Vegetationsperiode (April bis Oktober) die Summe aller Zeitfenster über alle Monate berechnet. Man erhält damit für jedes Jahr die Summe aller Dürreperioden von allen Zeitfenstern. Aus diesen 42 Summen (1971 – 2012) wird nun der Median berechnet. Der Median wird für die endgültige binäre Codierung verwendet. Liegt die Jahressumme der Dürreereignisse unter diesem Median, so erhält das Jahr den Wert 0, dies ist gleichbedeutend mit „keiner Dürre“. Liegt die Jahressumme über dem Median so wird dem Jahr der Wert 1 zugeteilt, dies bedeutet „Dürre“. Verglichen werden die Werte nun mit den Ernteanomalien des Sommergetreides im Bezirk Eferding und im Marchfeld. Es wird nun nicht das untere Perzentil verwendet, sondern die standardisierten Ernteerträge werden wie der SPI und der SPEI mittels des Medians geteilt. Der Grund für die Verwendung des Medians ist, dass die Anomalien des Sommergetreides im Marchfeld eine linksschiefe Verteilung besitzen. Berechnet man für diese Werte nun die Vierfeldertafel, sowie den AUC-Wert, so ergibt dies für alle Varianten keinen auffälligen Befund. Exemplarisch ist hier nur die Vierfeldertafel zwischen SPEI im Eferdinger Becken und der Ernte der Sommergerste dargestellt (siehe Tabelle 26).

	Sommergerste	
SPEI	Keine Dürre	Dürre
Keine Dürre	10	11
Dürre	12	9

*Tabelle 26 Vierfeldertafel für den Vergleich zwischen SPEI im Eferdinger Becken und den Ernteanomalien der Sommergerste im Bezirk Eferding*

Verwendet man nicht alle Zeitfenster, sondern immer nur eines der einzelnen Dürreindizes, so lässt sich anhand dieser Methode ebenso kein Zusammenhang herstellen. Einzelne Zeitfenster der Dürreindizes erzielen zwar bessere Ergebnisse, allerdings bleiben sie trotzdem zufällig, mit AUC-Werten von ca. 0,5 bei sämtlichen Möglichkeiten.

## 6. Diskussion der Ergebnisse

Die zu Beginn aufgestellte erste Null-Hypothese kann nicht vollständig abgelehnt werden. Aufgrund der Ernteanomalien lassen sich die Dürreindizes nicht eindeutig evaluieren. Dass die Dürreindizes eine erklärende Funktion für die Schwankungen besitzen, konnte in den zwei Modellen und der qualitativen Untersuchung bewiesen werden.

Die Ergebnisse der beiden Dürreindizes unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Berechnung. Der SPI im Marchfeld zeigt einen signifikanten negativen Niederschlagstrend, welcher im Eferdinger Becken nicht vorhanden ist. Der SPEI hat in beiden Gebieten einen positiven Trend. Der Chi-Quadrat-Test ergibt signifikant ähnliche Ergebnisse für beide Dürreindizes, innerhalb und zwischen den Untersuchungsgebieten. Mit steigendem Zeitfenster der Dürreindizes verringern sich die Übereinstimmungen.

Ebenso konnte festgestellt werden, dass das dreimonatige Zeitfenster des SPI und SPEI die besten Ergebnisse in der Modellierung der Ernteanomalien erzielt. Im Gegensatz zu Potop (2011) wurde somit eine andere Methode verwendet. Die Dürreereignisse, sowie die

Ernteanomalien, wurden binär codiert und deren Übereinstimmung mittels des ROC berechnet. Hierbei konnten Werte von bis zu 0,85 erzielt werden.

Die zweite Null-Hypothese kann abgelehnt werden. Die Differenzen des SPEI aufgrund verschiedener Modelle der PET sind signifikant und somit ist die Sensitivität des SPEI auf die Modelle der Evapotranspiration nachgewiesen. In dieser Arbeit zeigten sich Unterschiede von über 200 mm in der Berechnung der PET in Gänserndorf. Ebenso konnte ein negativer Trend in der Differenz der beiden Dürreindizes (Hargreaves – Thornthwaite) nachgewiesen werden. Einerseits kann dies auf die steigende Temperatur in den letzten 40 Jahren zurückgeführt werden, da das Thornthwaite-Modell einzig von der monatlichen Durchschnittstemperatur abhängt, andererseits könnte eine Veränderung der Bewölkung eine Rolle spielen, da die tägliche, beziehungsweise monatliche Temperaturspanne unter anderem von der Bewölkung abhängig ist. Eine Abnahme der Bewölkung würde die PET nach Hargreaves erhöhen und die Differenz zwischen den beiden Modellen verringern. Dieser Zusammenhang kann in dieser Arbeit aber nicht evaluiert werden.

Zusätzlich zeigte sich noch, dass die Ergebnisse der PET nach Thornthwaite näher an der gemessenen Evapotranspiration liegen (vgl. Harlfinger und Knees 1999), sowie die Resultate der PET nach Hargreaves mit der P-M-Methode übereinstimmen (Dobesch 1993). In weiteren Analysen wäre es sinnvoll die PM-Methode, für die Berechnung der PET, als Vergleich miteinzubeziehen.

## 7. Ausblick

Der verfolgte Ansatz landwirtschaftliche Dürreperioden anhand einer multiplen Regression von Dürreindizes zu eruieren, erwies sich nur bedingt als zielführend. Landwirtschaftliche Dürreperioden anhand einer multiplen linearen Regression von Dürreindizes zu eruieren, erscheint als Ansatz hingegen durchaus sinnvoll. Eine Modifikation der Zielvariablen müsste allerdings vorgenommen werden. Am praktikabelsten wären Daten, die Dürren eindeutig definieren, wie Schadensbeurteilungen von Versicherungen. Diese standen allerdings für diese Arbeit nicht für den gesamten Untersuchungszeitraum zur Verfügung. Eine detaillierte Evaluierung der Dürreindizes scheint sinnvoll, um die Konsequenzen in Klimamodellen genauer darstellen zu können. Der SPEI wird beispielsweise in Zukunft mehr Dürreperioden anzeigen, da die steigende Temperatur sowohl nach Hargreaves, als auch nach Thornthwaite, signifikant zu einem Trend beigetragen hat. Der SPEI ist aber, wie alle Indizes, nur ein simplifiziertes Modell, welches nicht den Anstieg des CO<sub>2</sub> in Betracht zieht. Einerseits kann dies zu einer erhöhten Biomasseproduktion und gesteigerter Photosynthese führen, andererseits erhöhen sich die Blatttemperaturen, dies bewirkt die vermehrte Schließung der Pflanzen-Stomata und senkt somit den Kühlungseffekt aufgrund verminderter Evapotranspiration (S. Thaler u. a. 2012). Die spezifische Evapotranspiration der Pflanzen wurde völlig außer Acht gelassen. Um eine breitere Analyse durchzuführen, könnte man ebenso auf zusätzliche Daten, wie die der Fernerkundung, zurückgreifen, welche Information über die Vegetation und den Hitzestress der Pflanzen bereitstellen kann. Somit stünden mehr Daten über den Wasserbedarf der Pflanzen bereit. Außerdem wäre eine Evaluierung der Evapotranspirationsmodelle anhand der Penman-Monteith-Methode sinnvoll, um die Ergebnisse besser einordnen zu können.



## 8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Karte des Marchfelds, Quelle: <a href="http://www.marchfeldkanal.at">www.marchfeldkanal.at</a> .....	8
Abbildung 2 Darstellung des Eferdinger Beckens, Quelle: Doris - Land Oberösterreich .....	9
Abbildung 3 die beiden Grafiken zeigen Walter-Lieth-Diagramme für das Marchfeld und das Eferdinger Becken. Für beide Gebiete wurde ein arithmetisches Mittel der einzelnen Stationen berechnet - für Temperatur und Niederschlag - welche in den beiden Grafiken abgebildet sind. Der Untersuchungszeitraum ist 1971 bis 2012. ....	10
Abbildung 4 Beispiel einer AUC-Kurve, hier wird der 12-monatige SPI mit dem 12-monatigen SPEI im Marchfeld verglichen. ....	13
Abbildung 5 Standardisierter Niederschlag im Eferdinger Becken und im Marchfeld. Untersuchungszeitraum von 1971 bis 2012. ....	15
Abbildung 6 Umwandlung der kumulativen Wahrscheinlichkeit des Niederschlags in den Z-Score des SPI, Quelle: (Lloyd-Hughes und Saunders 2002) .....	19
Abbildung 7 potentielle maximale durchschnittliche Sonnenscheindauer im Monat für einen Ort am 48. Breitengrad.....	25
Abbildung 8 Jahresgang der extraterrestrischen Sonneneinstrahlung in Eferding .....	27
Abbildung 9 Verteilungskurven des SPI für das Eferdinger Becken im Jänner und im Juli für alle Zeitskalen. Jänner und Juli sind dabei die letzten Monate des berechneten Zeitfensters..	30
Abbildung 10 Verteilungskurven des SPI für das Marchfeld im Jänner und im Juli für alle Zeitskalen. Jänner und Juli sind dabei die letzten Monate des berechneten Zeitfensters. ....	31
Abbildung 11 Verteilung von schweren und extremen Dürren im Eferdinger Becken über den gesamten Untersuchungszeitraum (1971-2012).....	33
Abbildung 12 Anzahl der Monate von starken und extremen Dürren im Marchfeld über den gesamten Untersuchungszeitraum (1971-2012).....	33
Abbildung 13 24-monatiger SPI für alle Monate im Marchfeld, Aufteilung der Zeitreihe in zwei Perioden.....	34
Abbildung 14 Boxplots der PET nach Thornthwaite für das Eferdinger Becken und das Marchfeld .....	37
Abbildung 15 Abweichungen der Jahressummen der PET vom Durchschnitt.....	38
Abbildung 16 Differenz zwischen einem AHC Schätzer, und zwölf AHC-Schätzern; Die Abbildung zeigt die Differenzen der durchschnittlichen Monatssummen der PET nach Hargreaves in mm. Methode „saison“ – Methode „mean“ für den Zeitraum von 1970 bis 2015 .....	39
Abbildung 17 Differenzen der Jahressummen (Hargreaves - Thornthwaite) der PET über den Zeitraum von 1971 bis 2012.....	40
Abbildung 18 Jahresverlauf der klimatischen Wasserbilanz, Berechnung der PET nach Thornthwaite .....	41
Abbildung 19 Anzahl der starken und extremen Dürreperioden von 1971-2012 im Eferdinger Becken.....	42
Abbildung 20 Anzahl der starken und extremen Dürreperioden von 1971-2012 im Marchfeld .....	43
Abbildung 21 Mann-Kendall-Trend-Test für die Differenzen zwischen dem SPEI mittels PET Berechnung nach Thornthwaite und SPEI mittels PET Berechnung nach Hargreaves. Der negative Trend nimmt dabei mit zunehmendem Zeitfenster zu. ....	44

Abbildung 22 AUC Werte für das Marchfeld und das Eferdinger Becken für den Vergleich zwischen SPI und SPEI. Die x-Achse beschreibt die gewählten Zeitfenster: 1 = 1 Monat, 2 = 2 Monate, 3 = 3 Monate, 4 = 6 Monate, 5 = 12 Monate. ....	47
Abbildung 23 Regressionsmodelle Eferding, Erträge in t/ha von 1971 bis 2015 .....	51
Abbildung 24 Regressionsmodelle Marchfeld, Erträge in t/ha von 1971 bis 2015 .....	52
Abbildung 25 Polynomanpassung an die Ernteerträge der Sommergerste in den Bezirken Gänserndorf, Eferding und Urfahr .....	53
Abbildung 26 Standardisierte Ernteerträge der Sommergerste in Eferding.....	54
Abbildung 27 Modellauswahl mittels des Befehls regsubset in R; die Blöcke deuten die Auswahl der einzelnen Monate für jede Stufe des Modells an. ....	56
Abbildung 28 ROC der Sommergerste im Marchfeld und des durchschnittlichen SPEI von Juli bis September .....	57

## 9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Länger der Zeitreihen der einzelnen Stationen im Eferdinger Becken.....	6
Tabelle 2 Länge der Zeitreihen der einzelnen Stationen im Marchfeld.....	6
Tabelle 3 die zur Verfügung stehende Daten über Ackerfrüchte auf Bundesländer und Bezirksebene.....	7
Tabelle 4 Beispiel einer Kontingenztafel. A, B, C und D sind hierbei die Anzahl der gemeinsamen Ausprägungen. Demnach steht A dafür wenn Ausprägung A und B gleichzeitig den Wert 0 besitzen, usw.....	13
Tabelle 5 AIC- und BIC-Werte für die Verteilungsanpassung des SPI, rot dargestellt sind die Minimum-Werte.....	18
Tabelle 6, SPI-Werte nach McKee et al. 1993.....	19
Tabelle 7 Anzahl und Häufigkeiten von Dürreperioden im Eferdinger Becken; Die Aufteilung erfolgte in die 4 berechnete Zeitskalen des SPI, sowie in das von McKee vorgeschlagene Schema.....	32
Tabelle 8 Anzahl und Häufigkeiten von Dürreperioden im Marchfeld.....	32
Tabelle 9 Korrelationskoeffizienten zwischen den zwei Untersuchungsgebieten; Untersucht wurden alle 4 verwendeten Zeitskalen des SPI.....	35
Tabelle 10 Beispiel für eine Kontingenztafel; Hier wird der einmonatige SPI des Marchfelds mit dem einmonatigen SPI des Eferdinger Beckens verglichen. Dürre = $SPI < -1$ , Keine Dürre = $SPI > -1$ .....	35
Tabelle 11 Durchschnittliche monatliche PET in mm nach Thornthwaite für alle Stationen; 1 = Daten vorhanden von 1971 – 2012, 2 = 1983 – 2012, 3 = 1996 – 2012, 4 = 1971 – 1980, 5 = 1981 – 2012, 6 = 1990 – 2012; rot sind die Stationen des Eferdinger Beckens, blau jene des Marchfelds.....	36
Tabelle 12 Durchschnittliche monatliche PET in mm nach Hargreaves für den Zeitraum von 1970 bis 2015; Die linke Spalte zeigt eine tägliche Berechnung der PET, die rechte Spalte eine monatliche Berechnung der PET.....	38
Tabelle 13 Vergleich des Hargreaves und des Thornthwaite-Modells zur Berechnung der PET; Daten sind in mm angegeben für den Zeitraum vom 1971 bis 2012.....	40
Tabelle 14 Anzahl und Wahrscheinlichkeiten der Dürreperioden im Marchfeld und im Eferdinger Becken.....	42
Tabelle 15 Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Untersuchungsgebieten für alle Zeitskalen des SPEI.....	43
Tabelle 16 Darstellung aller Vierfeldertafeln für den Vergleich des SPEI mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden. Die gewählten Zeitfenster sind hier 1,2,3 und 6 Monate.....	44
Tabelle 17 Korrelation zwischen SPI und SPEI.....	45
Tabelle 18 Prozentueller Anteil der Dürreperioden ( $< -1,5$ ) im Eferdinger Becken.....	45
Tabelle 19 Prozentueller Anteil der Dürreperioden ( $< -1,5$ ) im Marchfeld.....	46
Tabelle 20 Vierfeldertafel für den Vergleich zwischen SPI und SPEI in den beiden Untersuchungsgebieten. Die ausgewählten Zeitfenster der beiden Indizes sind hier 1,2,3 und 6 Monate.....	46
Tabelle 21 Schwere und extreme Dürren im Eferdinger Becken, Vergleich zwischen SPI und SPEI.....	48
Tabelle 22 Schwere und extreme Dürren im Marchfeld, Vergleich zwischen SPI und SPEI.....	49

Tabelle 23 Regressionsmodell zum Schätzen der fehlenden Werte, die ausgewählten Modelle sind grün markiert .....	50
Tabelle 24 Modellauswahl, bei $R^2$ von größer als 0,3 mit ausgewählten Monaten. Die angegebenen Monate sind jene, die das beste Modell für die jeweiligen Ernteanomalien liefern. Angegeben sind nur jene in denen das $R^2$ größer als 0,3 ist. Verwendet wurde der 3-monatige SPI und SPEI. ....	55
Tabelle 25 Korrelation der Mittelwerte der 3-monatigen Dürreindizes aus der Vegetationsphase (März bis Oktober) mit den Ernteanomalien.....	55
Tabelle 26 Vierfeldertafel für den Vergleich zwischen SPEI im Eferdinger Becken und den Ernteanomalien der Sommergerste im Bezirk Eferding .....	58

## 10. Literaturverzeichnis

- Allen, Richard G., Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith, und others. 1998. „Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56“. *FAO, Rome* 300 (9): D05109.
- Alley, William M. 1984. „The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions“. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23 (7): 1100–1109. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2.
- Anderson, Martha C., Christopher Hain, Brian Wardlow, Agustin Pimstein, John R. Mecikalski, und William P. Kustas. 2011. „Evaluation of Drought Indices Based on Thermal Remote Sensing of Evapotranspiration over the Continental United States“. *Journal of Climate* 24 (8): 2025–44. doi:10.1175/2010JCLI3812.1.
- Asadi Zarch, Mohammad Amin, Bellie Sivakumar, und Ashish Sharma. 2015. „Droughts in a Warming Climate: A Global Assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI)“. *Journal of Hydrology* 526 (Juli): 183–95. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.09.071.
- Auer, Ingeborg, Reinhard Böhm, Anita Jurkovic, Wolfgang Lipa, Alexander Orlik, Roland Potzmann, Wolfgang Schöner, u. a. 2007. „HISTALP—historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region“. *International Journal of Climatology* 27 (1): 17–46. doi:10.1002/joc.1377.
- Bachmair, S., I. Kohn, und K. Stahl. 2015. „Exploring the Link between Drought Indicators and Impacts“. *Natural Hazards and Earth System Science* 15 (6): 1381–97. doi:10.5194/nhess-15-1381-2015.
- Beguería, Santiago, Sergio M. Vicente-Serrano, Fergus Reig, und Borja Latorre. 2014. „Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Revisited: Parameter Fitting, Evapotranspiration Models, Tools, Datasets and Drought Monitoring“. *International Journal of Climatology* 34 (10): 3001–23. doi:10.1002/joc.3887.
- Blauhut, Veit, Lukas Gudmundsson, und Kerstin Stahl. 2015. „Towards pan-European drought risk maps: quantifying the link between drought indices and reported drought impacts“. *Environmental Research Letters* 10 (1): 14008. doi:10.1088/1748-9326/10/1/014008.
- Brunetti, Michele, Gianluca Lentini, Maurizio Maugeri, Teresa Nanni, Ingeborg Auer, Reinhard Böhm, und Wolfgang Schöner. 2009. „Climate Variability and Change in the Greater Alpine Region over the Last Two Centuries Based on Multi-Variable Analysis“. *International Journal of Climatology* 29 (15): 2197–2225. doi:10.1002/joc.1857.
- Byun, Hi-Ryong, und Donald A. Wilhite. 1999. „Objective quantification of drought severity and duration“. *Journal of Climate* 12 (9): 2747–2756.
- Dobesch, Hartwig. 1993. *Die Abschätzung der Regionalverdunstung in Ostösterreich*. Ergebnisse österreichischer Aktivitäten im Internationalen Hydrologischen Programm. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Eitzinger, J., M. Trnka, D. Semerádová, S. Thaler, E. Svobodová, P. Hlavinka, B. šiška, u. a. 2013. „Regional Climate Change Impacts on Agricultural Crop Production in Central and Eastern Europe – Hotspots, Regional Differences and Common Trends“. *The Journal of Agricultural Science* 151 (6): 787–812. doi:10.1017/S0021859612000767.
- Fahrmeir, Ludwig, Thomas Kneib, und Stefan Lang. 2009. *Regression*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-01837-4>.
- Fawcett, Tom. 2006. „An introduction to ROC analysis“. *Pattern recognition letters* 27 (8): 861–874.
- Fink, Max H., Otto Moog, Reinhard Wimmer, und Österreich, Hrsg. 2000. *Fliessgewässer-Naturräume Österreichs*. Monographien / Umweltbundesamt, Bd. 128. Wien: Umweltbundesamt.

- Geng, Guangpo, Jianjun Wu, Qianfeng Wang, Tianjie Lei, Bin He, Xiaohan Li, Xinyu Mo, Huiyi Luo, Hongkui Zhou, und Dachuan Liu. 2016. „Agricultural Drought Hazard Analysis during 1980-2008: A Global Perspective: GLOBAL AGRICULTURAL DROUGHT HAZARD ANALYSIS DURING 1980-2008“. *International Journal of Climatology* 36 (1): 389–99. doi:10.1002/joc.4356.
- Guttman, Nathaniel B. 1991. „A Sensitivity Analysis of the Palmer Hydrologic Drought Index1“. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 27 (5): 797–807. doi:10.1111/j.1752-1688.1991.tb01478.x.
- . 1998. „Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index“. *Journal of the American Water Resources Association* 34 (1): 113–121.
- Hadatsch, Sonja, und Bettina Götz, Hrsg. 2000. *Biologische Landwirtschaft im Marchfeld: potenzielle Entlastung des Natur- und Landschaftshaushaltes*. Monographien / Umweltbundesamt, Bd. 127. Wien: Umweltbundesamt.
- Hao, Zengchao, und Vijay P. Singh. 2015. „Drought Characterization from a Multivariate Perspective: A Review“. *Journal of Hydrology* 527 (August): 668–78. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.05.031.
- Hargreaves, George H., und Richard G. Allen. 2003. „History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation“, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, , Nr. 129(1): 53–63.
- Hargreaves, George, und Samani, Zohrab. 1985. „Reference Crop Evapotranspiration from Temperature“. *Applied Engineering in Agriculture* 1 (2): 96–99. doi:10.13031/2013.26773.
- Harlfinger, Otmar, und Gerd Knees. 1999. *Klimahandbuch der österreichischen Bodenschätzung: Klimatographie. 1 (1999)*. Mitgliederausg. Innsbruck: Wagner, Wien.
- Haslinger, Klaus, Daniel Koffler, Wolfgang Schöner, und Gregor Laaha. 2014. „Exploring the Link between Meteorological Drought and Streamflow: Effects of Climate-Catchment Interaction“. *Water Resources Research* 50 (3): 2468–87. doi:10.1002/2013WR015051.
- Haslinger, Klaus, Wolfgang Schöner, und Ivonne Anders. 2015. „Future Drought Probabilities in the Greater Alpine Region Based on COSMO-CLM Experiments – Spatial Patterns and Driving Forces“. *Meteorologische Zeitschrift*, Jänner. doi:10.1127/metz/2015/0604.
- Hayes, Michael J., Mark D. Svoboda, Donald A. Wilhite, und Olga V. Vanyarkho. 1999. „Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index“. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80 (3): 429–438. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2.
- Heim Jr, Richard R. 2002. „A review of twentieth-century drought indices used in the United States“. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8): 1149.
- Hosking, J. R. M. 1990. „L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics“. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 52 (1): 105–124.
- Keyantash, John, und John A. Dracup. 2002. „The quantification of drought: an evaluation of drought indices“. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8): 1167.
- Khalili, Davar, Tohid Farnoud, Hamed Jamshidi, Ali Akbar Kamgar-Haghighi, und Shahrokh Zand-Parsa. 2011. „Comparability Analyses of the SPI and RDI Meteorological Drought Indices in Different Climatic Zones“. *Water Resources Management* 25 (6): 1737–57. doi:10.1007/s11269-010-9772-z.
- Kumar, R., M. K. Jat, und V. Shankar. 2012. „Methods to Estimate Irrigated Reference Crop Evapotranspiration – a Review“. *Water Science & Technology* 66 (3): 525. doi:10.2166/wst.2012.191.

- Lesk, Corey, Pedram Rowhani, und Navin Ramankutty. 2016. „Influence of extreme weather disasters on global crop production“. *Nature* 529 (7584): 84–87. doi:10.1038/nature16467.
- Lloyd-Hughes, Benjamin, und Mark A. Saunders. 2002. „A Drought Climatology for Europe“. *International Journal of Climatology* 22 (13): 1571–92. doi:10.1002/joc.846.
- Loidl, Johannes. 2007. *Hydrogeologie des Eferdinger Beckens im Raum Hartkirchen (Oberösterreich) mit besonderer Berücksichtigung der Grundwassersituation im Bereich der Aschacher Au*.
- Martí, Pau, Manuel Zarzo, Karl Vanderlinden, und Joan Girona. 2015. „Parametric Expressions for the Adjusted Hargreaves Coefficient in Eastern Spain“. *Journal of Hydrology* 529 (Oktober): 1713–24. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.07.054.
- Mason, Simon J., und Nicholas E. Graham. 2002. „Areas beneath the relative operating characteristics (ROC) and relative operating levels (ROL) curves: Statistical significance and interpretation“. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 128 (584): 2145–2166.
- McKee, Thomas B., Nolan J. Doesken, John Kleist, und others. 1993. „The relationship of drought frequency and duration to time scales“. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17:179–183. American Meteorological Society Boston, MA, USA. <http://ccc.atmos.colostate.edu/relationshipofdroughtfrequency.pdf>.
- Mishra, Ashok K., und Vijay P. Singh. 2010. „A Review of Drought Concepts“. *Journal of Hydrology* 391 (1–2): 202–16. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- Nachtnebel, Hans-Peter, Martin Dokulil, Michael Kuhn, Willibald Loiskandl, Rudolf Sailer, Wolfgang Schöner, Günter Blöschl, Florian Hanzer, Matthew Herrnegger, und others. 2015. „Band 2 Kapitel 2: Der Einfluss des Klimawandels auf die Hydrosphäre Volume 2 Chapter 2: Climate Change Impact on the Hydrosphere“. Zugegriffen Dezember 2. [http://www.musiklexikon.ac.at:8000/buecher/files/Weitere\\_Online\\_Editionen/Sachstandsbericht\\_Klimawandel/072\\_APCC\\_AA\\_band2\\_kap2\\_411-466.pdf](http://www.musiklexikon.ac.at:8000/buecher/files/Weitere_Online_Editionen/Sachstandsbericht_Klimawandel/072_APCC_AA_band2_kap2_411-466.pdf).
- Nagl, Hubert. 1983. „Klima- und Wasserbilanztypen Österreichs - Versuch einer regionalen Gliederung mit besonderer Berücksichtigung des außeralpinen Raumes“, Geographischer Jahresbericht aus Österreich, XL: 50–73.
- Neugebauer, Nikolaus. 2013. „Estimation of Crop Water Requirements based on Remote Sensing Data - A Case Study of the Marchfeld Region in 2010“. Masterarbeit, BOKU.
- Neuwirth, Christian, und Barbara Hofer. 2013. „Spatial Sensitivity of Grassland Yields to Weather Variations in Austria and Its Implications for the Future“. *Applied Geography* 45 (Dezember): 332–41. doi:10.1016/j.apgeog.2013.08.010.
- Palmer, Wayne. 1965. *Meteorological Drought*. Washington.
- Potop, Vera. 2011. „Evolution of Drought Severity and Its Impact on Corn in the Republic of Moldova“. *Theoretical and Applied Climatology* 105 (3–4): 469–83. doi:10.1007/s00704-011-0403-2.
- Potop, Vera, Martin Možný, und Josef Soukup. 2012. „Drought Evolution at Various Time Scales in the Lowland Regions and Their Impact on Vegetable Crops in the Czech Republic“. *Agricultural and Forest Meteorology* 156 (April): 121–33. doi:10.1016/j.agrformet.2012.01.002.
- R Core Team. 2015. „R: A language and environment for statistical computing.“ R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- Rebetez, Martine, Helmut Mayer, Olivier Dupont, Dirk Schindler, Karl Gartner, Jürgen P. Kropp, und Anette Menzel. 2006. „Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis“. *Annals of Forest Science* 63 (6): 569–77. doi:10.1051/forest:2006043.
- Rischbeck, Pablo. 2007. *Der Einfluss von Klimaänderung, Bodenbearbeitung und Saattermin auf den Wasserhaushalt und das Ertragspotential von Getreide im Marchfeld*. Wien: Dissertation, BOKU.

- Schmidt, Klaus. 2009. *Maß und Wahrscheinlichkeit*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-89730-9>.
- Schönwiese, Christian-Dietrich. 2013a. *Klimatologie*. Wien-Köln-Weimar: Böhlau.
- . 2013b. *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Stuttgart: Gebrüder Borntraeger.
- Şenaut, Zekâi. 2015. *Applied Drought Modeling, Prediction, and Mitigation*. Amsterdam: Elsevier.
- Serinaldi, Francesco, Brunella Bonaccorso, Antonino Cancelliere, und Salvatore Grimaldi. 2009. „Probabilistic Characterization of Drought Properties through Copulas“. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 34 (10–12): 596–605. doi:10.1016/j.pce.2008.09.004.
- Shukla, Shraddhanand, und Andrew W. Wood. 2008. „Use of a Standardized Runoff Index for Characterizing Hydrologic Drought“. *Geophysical Research Letters* 35 (2). doi:10.1029/2007GL032487.
- Spinoni, Jonathan, Gustavo Naumann, Jürgen Vogt, und Paulo Barbosa. 2015. „European Drought Climatologies and Trends Based on a Multi-Indicator Approach“. *Global and Planetary Change* 127 (April): 50–57. doi:10.1016/j.gloplacha.2015.01.012.
- Stenitzer und Hösch. 2004. „Die Auswirkung der Klimaänderung auf den Bodenwasserhaushalt und die Erträge im Marchfeld - eine Simulationsstudie“. In , 27–41. Wien.
- Strauss, Franziska, Erwin Schmid, Elena Moltchanova, Herbert Formayer, und Xiuying Wang. 2012. „Modeling Climate Change and Biophysical Impacts of Crop Production in the Austrian Marchfeld Region“. *Climatic Change* 111 (3–4): 641–64. doi:10.1007/s10584-011-0171-0.
- Svoboda, Mark, Doug Le Comte, Mike Hayes, Richard Heim, Karin Gleason, Jim Angel, Brad Rippey, u. a. 2002. „Government and academic scientists are collaborating on a weekly product that uses a new classification scheme to depict drought’s severity, spatial extent, and impacts.“
- Thaler, Sabina, Josef Eitzinger, Martin Dubrovsky, und Miroslav Trnka. 2016. „CLIMATE CHANGE IMPACTS ON SELECTED CROPS IN MARCHFELD, 10.7 EASTERN AUSTRIA“. Zugegriffen Februar 15. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/138941.pdf>.
- Thaler, S., J. Eitzinger, M. Trnka, und M. Dubrovsky. 2012. „Impacts of Climate Change and Alternative Adaptation Options on Winter Wheat Yield and Water Productivity in a Dry Climate in Central Europe“. *The Journal of Agricultural Science* 150 (5): 537–55. doi:10.1017/S0021859612000093.
- Thorntwaite, C. W. 1948. „An Approach toward a Rational Classification of Climate“. *Geographical Review* 38 (1): 55. doi:10.2307/210739.
- Trnka, Miroslav, Daniela Semerádová, Josef Eitzinger, M. Dubrovsky, Donald Wilhite, Mark Svoboda, Michael Hayes, und Z. Zalud. 2003. „Selected methods of drought evaluation in South Moravia and Northern Austria“. *XI International poster day. Transport of water, chemicals and energy in soil–crop atmosphere system, Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia*. <http://www.ufa.cas.cz/dub/crop/trnka2003blava.pdf>.
- Tsakiris, G., und H. Vangelis. 2005. „Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration“, EWRA, .
- Vangelis, H., D. Tigkas, und G. Tsakiris. 2013. „The Effect of PET Method on Reconnaissance Drought Index (RDI) Calculation“. *Journal of Arid Environments* 88 (Jänner): 130–40. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.07.020.
- Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, und Gesellschaft für Pflanzenzüchtung, Hrsg. 2013. *Resistenz gegen biotischen Stress in der Pflanzenzüchtung: Resistenz gegen abiotischen Stress in der Pflanzenzüchtung*; 63.

- Tagung, 19. -21. November 2012. Tagung / Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 63. Irdning: Lehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein.
- Vicente-Serrano, Sergio M., Santiago Beguería, und Juan I. López-Moreno. 2010. „A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index“. *Journal of Climate* 23 (7): 1696–1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1.
- Vicente-Serrano, Sergio M., Gerard Van der Schrier, Santiago Beguería, Cesar Azorin-Molina, und Juan-I. Lopez-Moreno. 2015. „Contribution of Precipitation and Reference Evapotranspiration to Drought Indices under Different Climates“. *Journal of Hydrology* 526 (Juli): 42–54. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.025.
- Wells, Nathan, Steve Goddard, und Michael J. Hayes. 2004. „A self-calibrating Palmer drought severity index“. *Journal of Climate* 17 (12): 2335–2351.
- Xu, C.-Y., und V. P. Singh. 2001. „Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation“. *Hydrological processes* 15 (2): 305–319.
- Xu, C.-Y., und V.P. Singh. 2005. „Evaluation of Three Complementary Relationship Evapotranspiration Models by Water Balance Approach to Estimate Actual Regional Evapotranspiration in Different Climatic Regions“. *Journal of Hydrology* 308 (1–4): 105–21. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.10.024.
- Zhao, Lingling, Jun Xia, Chong-yu Xu, Zhonggen Wang, Leszek Sobkowiak, und Cangrui Long. 2013. „Evapotranspiration Estimation Methods in Hydrological Models“. *Journal of Geographical Sciences* 23 (2): 359–69. doi:10.1007/s11442-013-1015-9.
- Ziese, M., U. Schneider, A. Meyer-Christoffer, K. Schamm, J. Vido, P. Finger, P. Bissolli, S. Pietzsch, und A. Becker. 2014. „The GPCP Drought Index – a New, Combined and Gridded Global Drought Index“. *Earth System Science Data* 6 (2): 285–95. doi:10.5194/essd-6-285-2014.