

Vergleich von Trockenheitsindizes zur Nutzung in der Landwirtschaft unter den klimatischen Bedingungen Mitteleuropas

Sandra DÖRING, Jürgen DÖRING, Heinz BORG und Falk BÖTTCHER

7 Abbildungen und 7 Tabellen

Abstract

DÖRING, S., DÖRING, J., BORG, H., BÖTTCHER, F.: Comparison of drought indices for use in agriculture under the climatic conditions of central Germany. - *Hercynia N.F.* 44 (2011): 145 – 168.

Droughts may lead to lower agricultural yields. To quantify such conditions so-called drought indices are used in agricultural consulting. There is a large number of drought indices of which eight were chosen for this work to be checked for their suitability to quantify agricultural drought in central Germany. Artern was used as a representative site. It is typical for the dry region of central Germany and, due to its (for Germany) very low annual rainfall, ideal for the investigation of drought indices. To assess the suitability of the eight indices various criteria were considered.

The “Harlfinger-Knees-Index” came out best overall. The other indices are comparable for the actual assessment of drought, but must be inverted to improve their sensitivity or require data which are more difficult to obtain. This study revealed that all indices have major weaknesses and are not a good tool to describe drought. None could reflect the effect of drought on the time course of the soil moisture status or, ultimately, on yield. The reason for this failure is that none properly considers the amount of water stored in a soil. This is important, however, since stored water can buffer a temporary rainfall deficit. A certain period without rain therefore need not lead to drought stress in a plant, if there is enough water in the soil. For that reason any drought index which does not or not correctly consider the amount of water stored in the soil is inadequate.

For central Germany a drier climate is predicted for the future, especially during the growing season. Hence, in the coming years drought will become an ever more important issue in agricultural consulting. Consequently, a tool is needed to assess agricultural drought properly. There are various computer models of different complexity, which can simulate the soil moisture status and its effect on plant growth and yield. Hence, in a further study it should be investigated, if and at what level of complexity such models are better in the description of drought than drought indices.

Key words: drought indices, agricultural drought

1 Einleitung und Zielsetzung

Die aktuellen Diskussionen über eine globale Erwärmung und deren Auswirkungen führen zu einer vermehrten Betrachtung klimatologischer Gegebenheiten, so auch der Trockenheit und den damit verbundenen Bodenwasserhaushaltsbedingungen in der Landwirtschaft. Unabhängig von der intensiven Diskussion über mögliche Klimaänderungen sind Trockenheiten Grundbestandteil klimatischer Verhältnisse. Sie treten in verschiedenen Klimazonen, in verschiedener Intensität und Dauer sowie in verschiedenen Jahreszeiten auf (BAGROV 1992). Auch in Mitteleuropa werden häufig Trockenperioden beobachtet.

Es gibt verschiedene Formen von Trockenheit (GIBBS 1975, WILHITE 2000), die alle hohe wirtschaftliche Schäden nach sich ziehen können (FLEIG et al. 2006). Meteorologische Trockenheit entsteht durch ein längeres Niederschlagsdefizit oder durch schlechte Niederschlagsverteilung (MAYBANK et al. 1995). Landwirtschaftliche Trockenheit entwickelt sich aus einer meteorologischen Trockenheit, wenn die pflanzenverfügbare Wassermenge im Boden so weit absinkt und gleichzeitig der Wasserbedarf infolge hoher potenzieller Evapotranspiration so groß ist, dass es zu Trockenstress in der Pflanze kommt (SEEMAN et al.

1979). Die Konsequenz ist ein Ertragsausfall, dessen Umfang auch von der Pflanzenart, deren Entwicklungsstand und dem Bodentyp abhängt (HOUNAM et al. 1975). Hydrologische Trockenheit tritt erst auf, wenn die Niederschläge längere Zeit geringer waren als die Evapotranspiration und die Wasserstände in Flüssen, in Seen und im Grundwasser deshalb stark gesunken sind (WILHITE 2000). Während entsprechend hohe Niederschläge eine meteorologische Trockenheit sehr schnell und eine landwirtschaftliche in relativ kurzer Zeit beenden können, dauert es bei einer hydrologischen Trockenheit wesentlich länger. Vor allem das Wiederbefüllen der Grundwasservorräte nimmt viel Zeit in Anspruch.

Zur Erfassung und Quantifizierung landwirtschaftlicher Trockenheit werden häufig sogenannte Trockenheitsindizes herangezogen. Diese Bezeichnung ist nicht ganz korrekt, da Trockenheitsindizes in der Regel feuchte Bedingungen genau so gut anzeigen (MESHCHERSKAYA & BLAZHEVICH 1997). Sie wird aber hier beibehalten. Nach FARAGO et al. (1989) sollen die Indizes trockene oder feuchte Gebiete aufzeigen und so eine Planung des Anbaus verschiedener Kulturen ermöglichen. Mithilfe der Indizes lassen sich langjährige Trends darstellen, mit der eine Projektion für die Zukunft vorgenommen werden kann. Eine weitere Verwendung der Indizes sind Überlegungen hinsichtlich des Anbaus von Zwischenfrüchten. In einer trockenen Region, in der hydroklimatische Verhältnisse vorherrschen bei denen nur die Hauptfrucht versorgt werden kann, ist es nicht empfehlenswert einen Zwischenfruchtanbau durchzuführen (DIEPENBROCK et al. 1999).

Gegenstand dieser Arbeit ist der Vergleich verschiedener Trockenheitsindizes, um zu untersuchen, welcher davon für die Beschreibung landwirtschaftlicher Trockenheit in Mitteldeutschland am besten geeignet ist. Als Standort für die Untersuchungen wurde Artern ausgewählt (ca. 50 km westlich von Halle), weil er im mitteldeutschen Trockengebiet liegt, welches sich durch geringe Jahresniederschläge innerhalb Deutschlands auszeichnet (MÜLLER-WESTERMEIER 1996). Dieser Standort ist folglich gut geeignet, um Trockenheitsindizes zu betrachten. Für die Berechnung der Indizes wurden meteorologische Daten für Artern von 1961 bis 2008 sowie die nutzbare Feldkapazität des dortigen Bodens herangezogen. Die Kernfragen, die hier beantwortet werden sollen, lauten:

- Wie gut geben die ausgewählten Indizes landwirtschaftliche Trockenheit unter mitteldeutschen Verhältnissen wieder?

- Welcher Index ist für die Darstellung der Trockenkeitsverhältnisse in Mitteldeutschland am besten geeignet?

2 Vorstellung der ausgewählten Trockenheitsindizes

Die klimatische Wasserbilanz, die auf KUHNKE (1936) zurückgeht, wird als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung (Evapotranspiration) berechnet:

$$KWB = N - ET_p \quad (1)$$

N = Summe der Niederschläge [mm] im Betrachtungszeitraum in 1 m Höhe

ET_p = Summe der potenziellen Evapotranspiration [mm] im Betrachtungszeitraum

Im Allgemeinen wird Niederschlag in Deutschland in 1 m Höhe mit einem freistehenden Hellmann-Niederschlagsmesser erfasst. Dabei treten durch Wind, Benetzungsverluste und Verdunstung aus dem Sammelbehälter Fehler auf, die dazu führen, dass die gemessenen Niederschläge geringer sind als die tatsächlichen. Infolgedessen sind für exakte Wasserhaushaltsberechnungen Korrekturen notwendig, um diesen systematischen Fehlern zu begegnen. Meist wird ein Verfahren nach RICHTER (1995) verwendet, das für März bis November einen Aufschlag von 10 % und für Dezember bis Februar von 30 % auf den gemessenen Niederschlag vorsieht. Wird der so korrigierte Niederschlag (N_{korr}) in der KWB verwendet, erhält man die sogenannte korrigierte klimatische Wasserbilanz:

$$kKWB = N_{\text{korr}} - ET_p \quad (2)$$

Man kann auch einen Trockenheitsindex aus dem Verhältnis aus N und ET_p berechnen (Niederschlag-Verdunstungs-Index):

$$NVI = \frac{N}{ET_p} \quad (3)$$

Der Ariditäts- und Humiditätsindex nach DE MARTONNE (1926) ist der älteste der hier betrachteten Indizes. Er wird aus einem Verhältnis von Niederschlag und Lufttemperatur gebildet:

$$dMI = \frac{N}{(T+10)} \quad (4)$$

T = mittlere Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$] in 2 m Höhe im Betrachtungszeitraum

Die Konstante 10 im Nenner führt dazu, dass negative Werte im Nenner und damit negative Indexwerte weitgehend vermieden werden. Die Lufttemperatur wird als Maß für die ET_p angesehen.

Der Index nach REICHEL (1928, 1938) ist eine Weiterentwicklung des dMI, um zu berücksichtigen, dass nicht nur die Höhe, sondern auch Verteilung der Niederschläge für das Auftreten von Trockenheit eine Rolle spielt: Je mehr Niederschlagstage, desto geringer die Trockenheit (bei sonst gleichen Bedingungen):

$$RI = \frac{N}{(T+10)} \cdot \frac{k}{120} \quad (5)$$

k = Anzahl der Tage mit $\geq 1,0$ mm Niederschlag im Betrachtungszeitraum

Die 120 repräsentiert die mittlere Anzahl der Niederschlagstage im damaligen Gebiet Deutschlands. Ursprünglich hatte REICHEL (1928) dafür 180 Tage eingesetzt. Für $k = 120$ entspricht der RI dem dMI.

Für die Berechnung des hydrothermischen Koeffizienten nach SELJANINOV (1928) existieren verschiedene Varianten. Die hier verwendete stammt aus MESHCHERSKAYA & BLAZHEVICH (1997):

$$SHC = \frac{N}{0,1 \cdot TS} \quad (6)$$

TS = Summe der Tagesmittel der Lufttemperaturen $> 10^{\circ}\text{C}$ im Betrachtungszeitraum [K]

Auch dieser Index bildet ein Verhältnis zwischen Niederschlag und einem Temperaturparameter, aber im Unterschied zum dMI oder RI wird hier die Temperatursumme $> 10^{\circ}\text{C}$ verwendet. Für Zeiträume mit $T \leq 10^{\circ}\text{C}$ kann der SHC keine Werte liefern. In Mitteldeutschland betrifft das in der Regel die Monate November bis März. Im Vergleich zu den bisher vorgestellten Indizes ist der SHC daher in seiner Verwendbarkeit eingeschränkt.

Mit der Beziehung $N = 3 \cdot T$ haben WALTER & LIETH (1960) eine Trockenheitsgrenze definiert. HARLFINGER & KNEES (1999) haben sie dann zu einem Trockenheitsindex umgestellt, der für die Überarbeitung der Bodenschätzung in Österreich herangezogen wurde, um die lokalen klimatischen Bedingungen zu erfassen:

$$HKI = \frac{3 \cdot T}{N} \quad (7)$$

Im Gegensatz zum dMI, RI und SHC wird bei diesem Index das Verhältnis von N und Temperatur umgekehrt. Daher reflektieren die größeren Indexwerte hier Trockenheit, bei allen anderen hier vorgestellten Indizes dagegen feuchte Verhältnisse. In Zeiträumen mit $T < 0^{\circ}\text{C}$, die in Mitteldeutschland von Dezember bis Februar auftreten können, berechnet der HKI negative Werte.

Im Unterschied zu den anderen Indizes wird in der Klimafeuchtezahl nach MÜLLER et al. (2008a) anstelle der ET_p oder der Lufttemperatur das Dampfdruck-Sättigungsdefizit als Maß für die Verdunstung verwendet. Außerdem wird die nutzbare Feldkapazität des Bodens eingeführt, um den Einfluss der Wasserspeicherefähigkeit des Bodens auf Trockenheit zu berücksichtigen:

$$\text{KFZ} = \lg \left(\frac{N \cdot \sqrt{n\text{FK}}}{1 + \Delta e} + 1 \right) \quad (8)$$

nFK = nutzbare Feldkapazität [%] der oberen 100 cm des Bodens

Δe = Mittel des Mittagswertes des Sättigungsdefizits [hPa] der Luft im Betrachtungszeitraum

3 Daten und Vorgehensweise

3.1 Daten für Artern

Alle genannten Indizes verwenden Niederschlagsdaten sowie ein Maß für die Verdunstung. Bei einigen wird dafür direkt die ET_p eingesetzt. Da für diesen Parameter bzw. seine Berechnung oft Daten fehlen, werden bei anderen Indizes als indirektes Maß Temperaturdaten, bei der KFZ das Dampfdruckdefizit, genutzt. Daten für alle meteorologischen Parameter, die für die Berechnung der acht Indizes notwendig sind, existieren für den Standort Artern ab dem Jahr 1961 und sind vollständig bis zum aktuellen Zeitraum verfügbar. Für die Studie hier wurden Werte für 1961 bis 2008 verwendet, die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt wurden. Die für einige Indizes notwendige ET_p wurde vom DWD nach Penman-Wendling berechnet (DVWK 1996). Genau genommen berechnet diese Gleichung die sogenannte Grasreferenzverdunstung. Das ist die ET_p für einen 12 cm hohen und geschlossenen Bestand von *Lolium perenne*, der nicht unter Wassermangel leidet. Die ET_p ist für unterschiedliche Pflanzenarten verschieden. In dieser Arbeit bezieht sich ET_p stets auf *Lolium perenne*, also auf die Grasreferenzverdunstung.

Tab. 1 Kennwerte für Niederschlag (N), potenzielle Evapotranspiration (ET_p) und Lufttemperatur (T) für Artern für die Daten von 1961 bis 2008.

Tab. 1 Characteristics of precipitation (N), potential evapotranspiration (ET_p) and air temperature (T) for Artern derived from the data for 1961 to 2008.

	N [mm]	ET_p [mm]	T [°C]
Mittelwert (MW)	468	628	8,9
Standardabweichung	144	44	0,9
Minimum (Jahr)	263 (1991)	541 (1972)	7,3 (1963)
% von MW	56	86	81
Maximum (Jahr)	666 (2007)	726 (2003)	10,5 (2000)
% von MW	142	115	117

Die nFK wurde aus AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005) entnommen.

Tabelle 1 charakterisiert die klimatischen Verhältnisse am Standort Artern im Betrachtungszeitraum. Der Mittelwert der ET_p liegt 160 mm/Jahr über dem Mittelwert des Niederschlags. Bei voller Ausschöpfung der ET_p liegt in Artern über das gesamte Jahr gerechnet somit ein Wasserdefizit vor.

In Abbildung 1 sind die mittleren Monatswerte des Niederschlags, der ET_p und der Temperatur im Betrachtungszeitraum für Artern grafisch dargestellt. Von März bis Oktober und besonders deutlich von April bis September ist $ET_p > N$, sodass vor allem in diesen Monaten mit Trockenheit zu rechnen ist. Von November bis Februar ist $N > ET_p$. Trockenheit ist dann weniger wahrscheinlich, aber nicht ausgeschlossen.

Werden abhängige Größen in die Berechnung eines Trockenheitsindexes aufgenommen, kann es dadurch entweder zu einer Über- oder Untergewichtung eines Faktors kommen, da sich durch die Veränderung einer Größe die andere aufgrund der Abhängigkeit ebenfalls verändert. Die hier betrachteten Trocken-

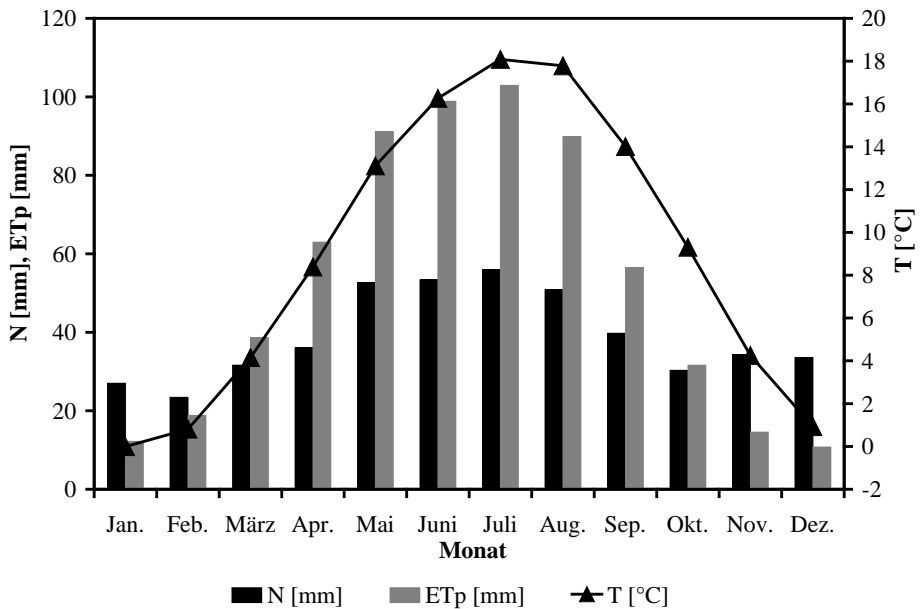


Abb. 1 Mittelwerte für Niederschlag (N), potenzielle Evapotranspiration (ET_p) und Lufttemperatur (T) für Artern für die Daten von 1961 bis 2008.

Fig. 1 Mean values of precipitation (N), potential evapotranspiration (ET_p) and air temperature (T) for Artern for the data from 1961 to 2008.

heitsindizes verwenden vor allem die Größen Niederschlag, ET_p und Temperatur. Abbildung 2 zeigt die Beziehung zwischen N und ET_p . Die Streuung der Werte ist sehr groß und das Bestimmtheitsmaß dementsprechend sehr niedrig. Es gibt also keine Abhängigkeit zwischen diesen beiden Variablen, die eine gleichzeitige Verwendung in einem Trockenheitsindex ausschließen würde. Das Gleiche gilt sinngemäß für die Beziehung zwischen N und T (Abb. 3).

In einigen Indizes wird T stellvertretend für ET_p verwendet. Für die Daten aus Artern liegt eine erkennbare Abhängigkeit vor (Abb. 4), auch wenn die Werte noch relativ stark streuen und das Bestimmtheitsmaß nicht besonders hoch ist. Sie ergibt sich daraus, dass die Temperatur durch ihren Effekt auf den Wasserdampfdruck eine wesentliche Größe für die Berechnung der Verdunstung ist. Dieser Zusammenhang zeigt, dass die Substitution der ET_p durch T hier vertretbar ist.

Eine Korrelation von Monatswerten für N, ET_p und T erbrachte die gleichen Ergebnisse (DÖRING 2010).

3.2 Vergleich und Bewertung der Trockenheitsindizes

Es gibt nicht „das“ Kriterium für die Güte eines Trockenheitsindexes, sodass hier mehrere Aspekte betrachtet werden, nämlich:

- Übereinstimmung der Indizes untereinander,
- Übereinstimmung der Indizes mit Bodenfeuchtwerten,
- Übereinstimmung der Indizes mit Ertragsdaten,
- Empfindlichkeit der Indizes gegenüber Änderungen der Eingangswerte,
- Aufwand zur Ermittlung der Indizes.

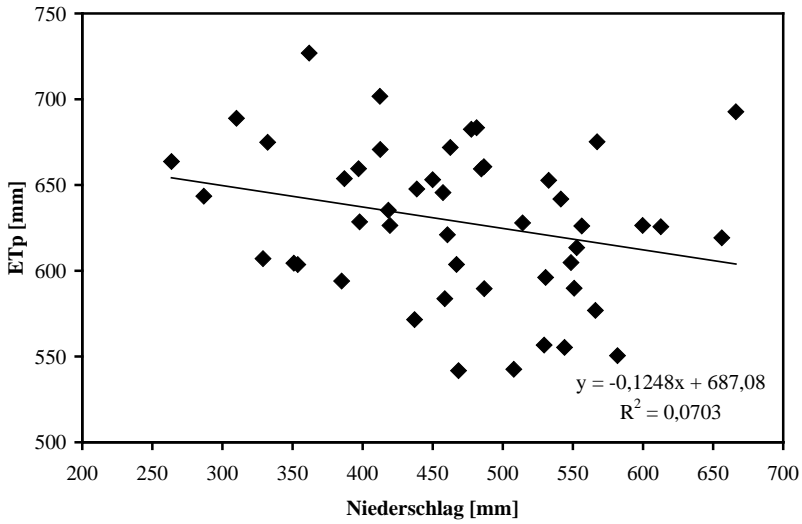


Abb. 2 Korrelation der Jahressummen des Niederschlags und der potenziellen Evapotranspiration (ET_p) für Artern von 1961 bis 2008.

Fig. 2 Correlation of the annual sums of precipitation and potential evapotranspiration (ET_p) for Artern from 1961 to 2008.

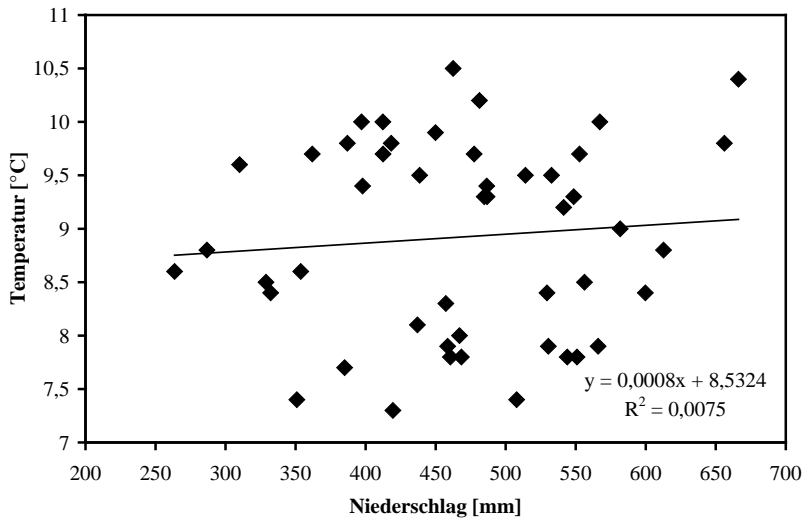


Abb. 3 Korrelation der Jahressummen des Niederschlags und der Jahresmitteltemperaturen für Artern von 1961 bis 2008.

Fig. 3 Correlation of the annual sums of precipitation and the mean annual temperatures for Artern from 1961 to 2008.

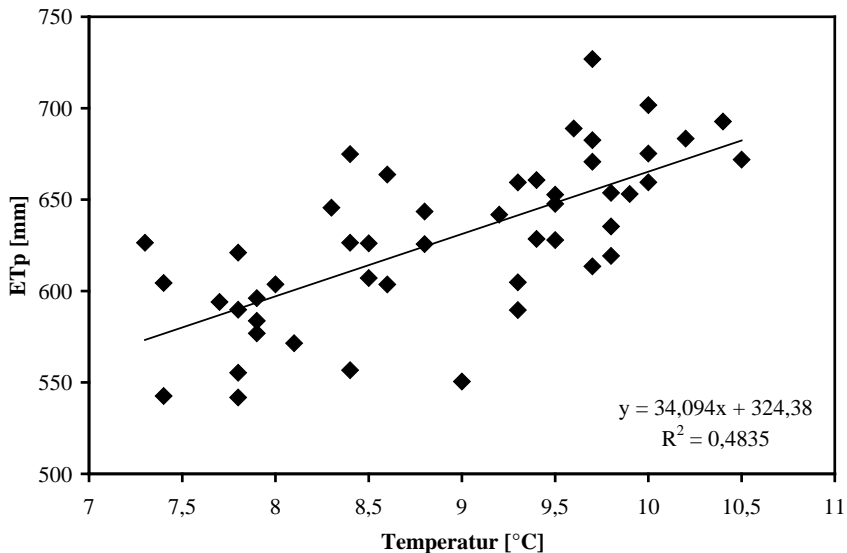


Abb. 4 Korrelation der Jahresmitteltemperaturen und der Jahressummen der potenziellen Evapotranspiration (ET_p) für Artern von 1961 bis 2008.

Fig. 4 Correlation of the mean annual temperatures and the annual sums of potential evapotranspiration (ET_p) for Artern from 1961 to 2008.

Um zu beurteilen, wie gut die Indizes landwirtschaftliche Trockenheit erfassen, sollten sie mit einem eindeutigen und objektiven Maß für Trockenheit verglichen werden. Leider liegt ein solches für Artern nicht vor. Aus diesem Grund wird hier davon ausgegangen, dass ein Jahr tatsächlich trocken war, wenn mehrere Indizes es als trocken ausweisen. Konkret wurde untersucht, inwieweit die Indizes die gleichen zwölf Jahre als die trockensten ausweisen. Außerdem wurden die Indizes miteinander korreliert. Eine häufige bzw. gute Übereinstimmung mit anderen Indizes wird als Gütezeichen gewertet. Je häufiger bzw. besser die Übereinstimmung, desto höher die Bewertung.

Ähnlich wurde anschließend mit den Monatswerten der Indizes verfahren. Darüber hinaus wurden für die zwölf trockensten Jahre die Werte für die einzelnen Monate für jeden Index gemittelt und damit die Jahresverläufe der acht Indizes grafisch dargestellt und miteinander verglichen.

Pflanzen erfahren Trockenheit vor allem dadurch, dass die pflanzenverfügbare Wassermenge im Boden abnimmt und ihnen als Folge die Aufnahme von Wasser immer schwerer fällt und letztlich nicht mehr möglich ist. Für eine Beurteilung, ob es tatsächlich trocken war, wenn ein Index Trockenheit anzeigt, wurden für das Jahr 2003 Bodenfeuchtedaten aus 0 – 50 cm Bodentiefe von einem Lysimeter in Brandis mit den Monatswerten der Trockenheitsindizes verglichen. Dafür wurden die Indizes mit meteorologischen Daten für Brandis berechnet.

Trockenheit wirkt sich auf den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen aus, der somit als Indikator für die Brauchbarkeit der Indizes herangezogen werden kann. Für Artern existieren keine dafür nutzbaren Ertragsdaten. Die Jahreswerte der acht Trockenheitsindizes für Artern wurden daher den Kartoffelerträgen auf dem Julius-Kühn-Versuchsfeld des Instituts für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität am Stadtrand von Halle (ca. 50 km östlich von Artern) gegenübergestellt. Dafür sind Daten von 1970 bis 2008 vorhanden. Kartoffeln eignen sich für einen solchen Vergleich sehr gut, da sich das Wachstum über den interessantesten Zeitraum für Trockenheit, nämlich vom späten Frühling bis zum späten Sommer, erstreckt. Allerdings können auch andere Faktoren zu Ertragsverlusten führen (z.B.

Schädlinge, späte Pflanzung, Hagelschläge oder Pflanzenkrankheiten) und im Nachhinein kann oft nicht mehr festgestellt werden, wodurch sie letztlich hervorgerufen wurden. Daher ist keine perfekte Beziehung zu erwarten.

Wie sich der Wert eines Indexes ändert, wenn sich die Eingangswerte ändern, bestimmt, wie deutlich Trockenheit angezeigt wird und ist daher ein wichtiges Gütekriterium. Mathematisch ist die Änderung eines Indexes I bei Änderungen in einer Variablen v , die in seine Berechnung eingeht, die erste Ableitung von I nach v . Wenn noch andere Variablen in die Berechnung von I eingehen (z.B. w), muss auch die Ableitung von I gegenüber dieser Variablen betrachtet werden. Zur Analyse des „Empfindlichkeitsverhaltens“ wurden die Ableitungen der einzelnen Indizes nach den jeweils in sie eingehenden Variablen gebildet. Da jeder Index von mehreren Variablen abhängt, handelt es sich um partielle Ableitungen. Im Idealfall sollte ein Index umso empfindlicher reagieren, je trockener die Bedingungen sind. Je näher ein Index diesem Verhalten kommt, desto besser wurde er bewertet.

Die Verwendbarkeit eines Trockenheitsindex hängt maßgeblich davon ab, wie aufwändig es ist die Eingangsdaten zu beschaffen. Daher wurde der Aufwand für die Datenbeschaffung für die acht Indizes eingeschätzt. Je geringer der Aufwand, desto besser wurde der Index bewertet.

Für die Bewertung der Indizes wurde ein vierstufiges System zugrunde gelegt: drei Punkte werden bei guter Erfüllung des jeweiligen Kriteriums vergeben, zwei Punkte bei mittlerer und ein Punkt bei schlechter. Wenn das Kriterium gar nicht erfüllt wird, gibt es null Punkte.

4 Ergebnisse

4.1 Übereinstimmung der Trockenheitsindizes untereinander

Jahreswerte

Die Jahreswerte der einzelnen Indizes von 1961 – 2008 sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Indizes werden unterschiedlich berechnet, sodass auch die Ergebniswerte unterschiedlich sind. Bei der kKWB liegen sie z.B. zwischen -361 und +130, beim HKI dagegen zwischen 0,04 und 0,1. Sie lassen sich somit nicht direkt vergleichen; es fehlt eine Beurteilung, welcher Wert eines Trockenheitsindex dem Wert eines anderen Indexes gleich ist. Es ist auch nicht offenkundig, was ein bestimmter Indexwert aussagt, also welchen Grad der Trockenheit er repräsentiert. Dazu nun einige Erklärungen.

Die KWB und kKWB sind bis zu einem gewissen Grad anhand der Höhe und dem Vorzeichen der Werte interpretierbar. Negative Werte kennzeichnen ein Wasserdefizit, positive einen Wasserüberschuss. Definiert man eine negative KWB als trocken, dann waren bis auf 1977 und 2002 alle Jahre im Betrachtungszeitraum trocken (in Tab. 2 grau hinterlegt). Tut man das Gleiche für die kKWB, waren nur noch 34 Jahre trocken. Das liegt daran, dass in der kKWB die Niederschläge durch die Korrektur höher werden während die ET_p gleich bleibt. Als Konsequenz ergeben sich mehr Jahre mit Wasserüberschuss, also weniger trockene Jahre.

Viele landwirtschaftliche Nutzpflanzen wachsen nicht das ganze Jahr. Außerdem bedecken sie am Anfang ihres Wachstums den Boden nicht zu 100 %. Folglich ist die Verdunstung durch solche Pflanzenbestände kleiner als die ET_p . Das bedeutet, dass bis zu einem gewissen Grad ein durch die KWB bzw. kKWB ausgewiesenes Wasserdefizit noch keine Trockenheit für die Pflanzen zur Folge haben muss. Wie groß dieses Defizit sein darf, hängt von der Pflanzenart und dem Entwicklungsstand beim Auftreten einer Trockenheit ab (TAHIRO 2002, BUCHNER et al. 2006). Es ist daher schwierig für die KWB oder kKWB eine allgemeingültige Grenze für Trockenheit zu definieren.

Beim NVI entsprechen Werte > 1 einem Wasserüberschuss und Werte < 1 einem Wasserdefizit. Wasserüberschuss tritt hier nur zweimal auf, nämlich 1977 und 2002, genau wie bei der KWB. Aus den gleichen Gründen wie bei der KWB gilt auch hier, dass ein gewisses Wasserdefizit noch keine pflanzenrelevante Trockenheit zur Folge haben muss. Während bei der KWB demnach der Wert bis zu einem bestimmten, pflanzenabhängigen Wert negativ sein darf, kann der Wert des NVI bis zu einem bestimmten Grad < 1 sein. Wie bei der KWB ist es auch für den NVI schwierig eine generelle Grenze für Trockenheit zu definieren.

Tab. 2 Jahreswerte der Trockenheitsindizes für Artern von 1961 bis 2008. Grau hinterlegte Werte zeigen trockene Jahre gemäß in der Literatur genannter Grenzwerte für Trockenheit. Die Abkürzungen sind in Kapitel 2 erklärt.

Tab. 2 Annual values of the drought indices for Artern from 1961 to 2008. The shaded values indicate dry years according to threshold values for drought stated in the literature. The abbreviations are explained in chapter 2.

Jahr	KWB	kKWB	NVI	dMI	RI	SHC	HKI	KFZ
1961	-56	24	0,907	28,4	23,4	5,63	0,0509	2,40
1962	-254	-202	0,581	20,2	14,1	4,83	0,0633	2,33
1963	-207	-158	0,670	24,2	16,2	4,43	0,0522	2,34
1964	-343	-302	0,492	18,0	9,8	3,19	0,0759	2,13
1965	-39	38	0,934	31,0	25,0	7,56	0,0425	2,46
1966	-13	75	0,979	32,6	31,0	6,34	0,0431	2,54
1967	-175	-109	0,735	25,1	20,5	4,93	0,0576	2,35
1968	-188	-126	0,708	25,0	18,5	4,81	0,0545	2,34
1969	-160	-98	0,742	25,9	21,6	4,74	0,0508	2,36
1970	-11	67	0,981	31,6	30,3	6,33	0,0419	2,51
1971	-250	-206	0,586	19,0	11,2	3,76	0,0729	2,21
1972	-73	-23	0,865	26,3	16,9	6,35	0,0500	2,41
1973	-278	-233	0,542	17,8	12,6	3,43	0,0775	2,19
1974	-103	-32	0,825	25,2	21,6	6,32	0,0573	2,38
1975	-231	-184	0,633	20,5	13,5	3,64	0,0709	2,24
1976	-357	-311	0,446	15,2	7,9	2,69	0,0921	2,07
1977	31	105	1,057	30,6	23,7	7,12	0,0464	2,49
1978	-134	-76	0,765	24,1	17,7	5,96	0,0556	2,34
1979	-125	-60	0,786	25,6	20,3	5,25	0,0517	2,35
1980	-137	-76	0,774	25,9	21,8	5,88	0,0514	2,37
1981	-27	59	0,957	32,6	32,3	6,30	0,0420	2,48
1982	-379	-337	0,450	15,8	9,0	2,65	0,0929	2,08
1983	-120	-53	0,816	27,3	20,3	4,92	0,0535	2,35
1984	-27	45	0,951	28,8	24,2	6,67	0,0476	2,44
1985	-209	-154	0,648	21,8	15,2	4,23	0,0600	2,30
1986	-66	10	0,890	29,6	25,2	6,25	0,0447	2,42
1987	-11	66	0,980	30,6	25,7	6,23	0,0430	2,46
1988	-217	-150	0,658	21,1	18,3	3,99	0,0703	2,26
1989	-267	-210	0,592	19,6	13,7	3,69	0,0760	2,20
1990	-262	-203	0,602	19,9	13,2	4,16	0,0755	2,20
1991	-400	-361	0,397	14,0	9,0	2,78	0,1013	2,06
1992	-205	-144	0,700	24,2	18,8	4,23	0,0609	2,30
1993	-70	13	0,889	29,6	24,2	5,91	0,0475	2,44
1994	-108	-35	0,840	28,4	24,8	5,01	0,0529	2,36
1995	-174	-104	0,736	25,1	19,6	4,40	0,0580	2,30
1996	-35	27	0,936	29,2	21,6	6,08	0,0437	2,46
1997	-100	-22	0,844	28,2	24,2	5,15	0,0510	2,38
1998	-61	2	0,901	28,1	26,9	5,44	0,0527	2,41
1999	-202	-134	0,704	23,8	19,5	4,11	0,0636	2,30
2000	-209	-145	0,688	22,6	18,0	4,15	0,0681	2,29
2001	-114	-42	0,819	26,4	23,5	4,80	0,0554	2,37
2002	37	130	1,060	33,1	28,4	5,98	0,0448	2,47
2003	-365	-315	0,498	18,4	10,4	2,81	0,0804	2,12
2004	-209	-153	0,677	22,5	18,2	4,42	0,0650	2,28
2005	-258	-203	0,615	20,9	14,5	3,71	0,0705	2,22
2006	-289	-239	0,588	20,6	15,8	3,19	0,0728	2,20
2007	-26	61	0,962	32,7	29,7	6,09	0,0468	2,44
2008	-203	-145	0,689	22,6	11,5	4,27	0,0600	2,29

Für den dMI wird vom METEOROLOGISCHEN UND HYDROLOGISCHEN DIENST DER DDR (1953) eine Grenze der „biologischen Trockenheit“ als $dMI \leq 20$ festgelegt. Nach dieser Definition weist der dMI neun Jahre als trocken aus.

REICHEL (1928, 1938) selbst legt keine Grenze für Trockenheit fest. Da der RI eine Weiterentwicklung des dMI ist, kann auch hier zunächst davon ausgegangen werden, dass Werte von $RI \leq 20$ trockene Jahre aufzeigen. In Tabelle 2 werden danach durch den RI 25 Jahre als trocken identifiziert.

Für den SHC wird in MESHCHERSKAYA & BLAZHEVICH (1997) kein Grenzwert für Trockenheit erwähnt. Auch anderswo haben wir dazu keine Angaben gefunden, sodass in Tabelle 2 für den SHC keine Werte markiert sind.

Für den HKI wird in HARLFINGER & KNEES (1999) nur ein Grenzwert für trockene Monate angegeben ($HKI > 1,5$). Nach der ursprünglichen Beziehung von WALTER & LIETH (1960), welche die Trockenheitsgrenze als $N = 3 \cdot T$ definiert, gilt ein Monat bereits als trocken, wenn $HKI > 1$. In Anlehnung an Ausführungen von SCHREIBER (1973) kann man diese Werte durch 12 teilen, um Grenzen für Jahreswerte zu erhalten. Daraus folgt $HKI > 1,5 / 12 = 0,125$ bzw. $HKI > 1 / 12 = 0,0833$. Die zuerst genannte Grenze wird hier in keinem Jahr überschritten, die zweite in drei Jahren (Tab. 2).

Die KFZ wird nach MÜLLER et al. (2008a) folgendermaßen abgegrenzt: Werte $< 1,75$ werden als arid eingeordnet, Werte von 1,76 bis 2,25 stellen den semiariden Bereich dar und Werte von 2,26 bis 2,5 sind neutral. Werte von 2,51 bis 2,75 kennzeichnen den semihumiden Bereich und Werte $> 2,75$ stehen für den humiden Bereich. Für Artern wurde im Betrachtungszeitraum kein arider Wert ermittelt, aber 12 Werte im semiariden Bereich.

Nach Tabelle 2 weisen die verschiedenen Indizes zwischen 3 und 46 Jahren als trocken (grau hinterlegt) aus. Die oben genannten Grenzwerte der einzelnen Indizes für trockene Jahre können also für Artern so nicht übernommen werden und müssen wahrscheinlich auch für jeden anderen Standort neu definiert werden.

Tabelle 3 zeigt die Rangfolge der Daten aus Tabelle 2 für jeden Index. Das jeweils trockenste Jahr erhielt den Rang 1, das feuchteste den Rang 48, die anderen Jahre ihren entsprechenden Rang dazwischen. Weiterhin sind die jeweils zwölf trockensten Jahre, die von einem Index ausgewiesen werden, grau hinterlegt. In Tabelle 4 sind nun die zwölf Jahre aufgeführt, die von einer Mehrheit der Indizes als die trockensten identifiziert wurden. Bei den sieben Trockensten gibt es eine sehr gute Übereinstimmung. Sie werden von allen Indizes genannt und der Rang, der von einem Index gegeben wurde, unterscheidet sich maximal um drei Plätze vom durchschnittlichen Rang für alle acht Indizes. Auch die Jahre acht bis zwölf in der Rangfolge der Trockenheit werden von den meisten Indizes mit guter Übereinstimmung aufgezeigt. Wenn ein Index eines dieser Jahre nicht unter die trockensten rechnet, ist die Einstufung nicht weit davon entfernt: In fünf Fällen hat das fragliche Jahr den Rang 13, in zwei Fällen Rang 15. Tendenziell wird die Übereinstimmung der Indizes mit abnehmender Trockenheit etwas schlechter.

Zieht man die absoluten Werte eines Indexes für die zwölf Jahre in Tabelle 4 heran, so ergeben sich als Grenzwerte für Trockenheit in Mitteldeutschland (Artern) die Werte in Tabelle 5. Die Grenze für die KFZ stimmt mit der vorher genannten überein, die Grenzen für den dMI liegen dicht beieinander. Für den RI und HKI ergibt sich ein deutlich niedrigerer Grenzwert. Für den SHC kann nun ein Grenzwert von 4 festgelegt werden. Gemäß den o.g. Erläuterungen, dass ein gewisses Wasserdefizit noch keine Trockenheit für einen Pflanzenbestand bedeutet, zeigt Tabelle 5 für die KWB ein Defizit von -230 mm und für die kKWB von -180 mm. Für den NVI ergibt sich ein Verhältnis von 0,64.

Als weiterer Test, wie gut die Indizes übereinstimmen, wurden sie miteinander korreliert. Tabelle 6 zeigt die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Korrelationen und die Art der Beziehung. Mit einer Ausnahme sind alle $R^2 > 0,8$, was erneut bestätigt, dass die Indizes gut miteinander korrelieren.

Die KWB und kKWB korrelieren besonders gut ($R^2 > 0,99$). Es gibt eine enge lineare Beziehung mit einer geringen Streuung der Werte, die aus der gleichartigen Berechnung resultiert. In der kKWB ist nur der Niederschlag aufgrund der Korrektur etwas höher, die ET_p bleibt unverändert.

Tab. 3 Rang der Jahreswerte der Trockenheitsindizes für Artern von 1961 bis 2008. 1 = trockenstes Jahr, 48 = feuchtestes Jahr. Die zwölf trockensten Jahre für jeden Index sind grau hinterlegt. Die Abkürzungen sind in Kapitel 2 erklärt.

Tab. 3 Rank of the annual values of the drought indices for Artern from 1961 to 2008. 1 = driest year, 48 = wettest year. The twelve driest years identified by a given index are shaded. The abbreviations are explained in chapter 2.

Jahr	KWB	kKWB	NVI	dMI	RI	SHC	HKI	KFZ
1961	38	38	38	36	33	32	34	34
1962	11	12	7	10	12	25	17	21
1963	18	14	16	22	16	21	30	22
1964	5	5	4	5	4	5	7	5
1965	39	40	39	43	40	48	46	41
1966	44	46	44	45	47	44	44	48
1967	23	23	23	25	28	27	22	27
1968	22	22	22	23	22	24	26	23
1969	25	25	25	28	29	22	35	29
1970	46	45	46	44	46	43	48	47
1971	12	9	8	7	6	11	9	10
1972	34	33	34	30	17	45	36	36
1973	7	7	6	4	8	7	5	6
1974	32	32	31	26	31	42	23	33
1975	13	13	13	11	10	8	11	12
1976	4	4	2	2	1	2	3	2
1977	47	47	47	42	35	47	40	46
1978	27	26	26	20	18	35	24	24
1979	28	28	28	27	27	30	31	25
1980	26	27	27	29	32	33	32	30
1981	42	42	42	46	48	41	47	45
1982	2	2	3	3	3	1	2	3
1983	29	29	29	32	26	26	27	26
1984	41	41	41	37	38	46	37	39
1985	17	15	14	15	14	17	19	17
1986	36	36	36	40	41	40	42	37
1987	45	44	45	41	42	39	45	42
1988	14	17	15	14	21	12	13	13
1989	8	8	10	8	11	9	6	8
1990	9	11	11	9	9	15	8	9
1991	1	1	1	1	2	3	1	1
1992	19	20	20	21	23	16	18	18
1993	35	37	35	39	36	34	38	38
1994	31	31	32	35	39	28	28	28
1995	24	24	24	24	25	19	21	20
1996	40	39	40	38	30	37	43	43
1997	33	34	33	34	37	29	33	32
1998	37	35	37	33	43	31	29	35
1999	21	21	21	19	24	13	16	19
2000	15	19	18	17	19	14	14	16
2001	30	30	30	31	34	23	25	31
2002	48	48	48	48	44	36	41	44
2003	3	3	5	6	5	4	4	4
2004	16	16	17	16	20	20	15	14
2005	10	10	12	13	13	10	12	11
2006	6	6	9	12	15	6	10	7
2007	43	43	43	47	45	38	39	40
2008	20	18	19	18	7	18	20	15

Tab. 4 Liste der zwölf Jahre, die von einer Mehrheit der Trockenheitsindizes als die trockensten identifiziert wurden. Die Abkürzungen sind in Kapitel 2 erklärt.

Tab. 4 List of the twelve years which were identified as the driest by a majority of the drought indices. The abbreviations are explained in chapter 2.

Jahr	Spannweite der Ränge	mittlerer Rang	Nennung
1991	1 - 3	1,4	alle
1982	1 - 3	2,4	alle
1976	1 - 4	2,5	alle
2003	3 - 6	4,3	alle
1964	4 - 7	5,0	alle
1973	4 - 8	6,3	alle
1989	6 - 11	8,5	alle
2006	6 - 15	8,9	alle außer RI (15)
1971	6 - 12	9,0	alle
1990	8 - 15	10,1	alle außer SHC (15)
1975	8 - 13	11,4	alle außer KWB (13), kKWB (13) und NVI (13)
2005	10 - 13	11,4	alle außer dMI (13) und RI (13)

Tab. 5 Grenzen für Trockenheit unter mitteldeutschen Verhältnissen (Artern) für die verschiedenen Trockenheitsindizes auf Basis der zwölf Jahre in Tabelle 4. Die Abkürzungen sind in Kapitel 2 erklärt.

Tab. 5 Drought limits under the conditions of central Germany (Artern) for the various drought indices, based on the twelve years in Table 4. The abbreviations are explained in chapter 2.

Index	Grenzwert
KWB	< -230 mm
kKWB	< -180 mm
NVI	< 0,64
dMI	< 21
RI	< 15
SHC	< 4
HKI	> 0,07
KFZ	< 2,25

Eine genauso gute Korrelation gibt es auch zwischen der KWB bzw. kKWB und dem NVI. Das ist nicht verwunderlich, da diese Indizes die gleichen Eingangswerte benutzen, die KWB und kKWB allerdings als Differenz, der NVI als Verhältnis. Alle drei korrelieren auch gut mit dem dMI, HKI und der KFZ ($0,892 < R^2 < 0,955$), die wiederum untereinander gut korrelieren ($0,936 < R^2 < 0,955$).

Mit $R^2 = 0,910$ ist die Beziehung zwischen dem RI und dem dMI recht gut. Das war zu erwarten, da sich diese beiden Indizes nur durch den Term $k/120$ im RI unterscheiden. Die Beziehungen zwischen dem RI und den anderen Indizes sind jedoch schlechter ($R^2 \leq 0,858$), aber außer für den SHC ($R^2 = 0,684$) noch akzeptabel. Ähnlich verhält es sich mit dem SHC. Er korreliert gut mit der KFZ ($R^2 = 0,924$), schlechter

aber noch annehmbar mit der KWB, kKWB, dem NVI, dMI und HKI ($0,802 < R^2 < 0,893$) und nicht mehr zufriedenstellend mit dem RI.

Auffallend ist zudem, dass alle Beziehungen mit dem HKI und der KFZ (bei dieser außer mit dem NVI) nicht linear sind. Beim HKI lässt sich das in Bezug auf dMI, RI und SHC damit erklären, dass er ein Verhältnis T/N beinhaltet, die anderen drei dagegen das Umgekehrte, nämlich N/T bzw. N/TS. Da, wie oben erläutert, T als Ersatz für ET_p verwendet wird, ist auch die nicht-lineare Beziehung zwischen HKI und NVI erklärbar. Die Gründe für die nicht-lineare Korrelation des HKI mit der KWB, kKWB und KFZ, bzw. der KFZ mit allen anderen Indizes außer dem NVI, sind nicht offensichtlich.

Welcher Index hinsichtlich der Rangfolge der trockensten Jahre zwischen 1961 und 2008 am richtigsten liegt, lässt sich im Nachhinein nicht ermitteln. Alle acht Indizes nennen praktisch die gleichen Jahre als die trockensten, wenn auch in leicht abweichender Reihenfolge (vgl. Tab. 4). Sie eignen sich daher grundsätzlich alle dazu, trockene Jahre in Mitteldeutschland auszuweisen. Die Korrelationen von RI und SHC mit den übrigen Indizes sind allerdings weniger gut als die von KWB, kKWB, NVI, dMI, HKI und KFZ. Daraus wird hier gefolgert, dass die letztgenannten Indizes wegen ihrer besseren Übereinstimmung zuverlässiger sind. Sie werden daher mit 3 Punkten bewertet, RI und SHC nur mit 2.

Tab. 6 Bestimmtheitsmaße (R^2) und Art der Beziehung (linear bzw. nicht-linear) zwischen den acht Trockenheitsindizes. Die Abkürzungen sind in Kapitel 2 erklärt.

Tab. 6 Coefficients of determination (R^2) and type of relationship (linear or non-linear) between the eight drought indices. The abbreviations are explained in chapter 2.

	KWB	kKWB	NVI	dMI	RI	SHC	HKI	KFZ
KWB	-	linear 0,997	linear 0,991	linear 0,937	linear 0,833	linear 0,879	n. linear 0,918	n. linear 0,952
kKWB	linear 0,997	-	linear 0,993	linear 0,950	linear 0,858	linear 0,866	n. linear 0,914	n. linear 0,949
NVI	linear 0,991	linear 0,993	-	linear 0,955	linear 0,852	linear 0,856	n. linear 0,892	linear 0,928
dMI	linear 0,937	linear 0,950	linear 0,955	-	linear 0,910	linear 0,802	n. linear 0,955	n. linear 0,936
RI	linear 0,833	linear 0,858	linear 0,852	linear 0,910	-	linear 0,684	n. linear 0,816	n. linear 0,858
SHC	linear 0,879	linear 0,866	linear 0,856	linear 0,802	linear 0,684	-	n. linear 0,893	n. linear 0,924
HKI	n. linear 0,918	n. linear 0,914	n. linear 0,892	n. linear 0,955	n. linear 0,816	n. linear 0,893	-	n. linear 0,950
KFZ	n. linear 0,952	n. linear 0,949	linear 0,928	n. linear 0,936	n. linear 0,858	n. linear 0,924	n. linear 0,950	-

Monatswerte

Um die trockensten Monate zu identifizieren, wurden die Indizeswerte für die insgesamt 576 Monate im Betrachtungszeitraum, wie schon bei den Jahreswerten, in die Rangfolge für den jeweiligen Index umgewandelt. Die Übereinstimmung zwischen den Indizes ist hier wesentlich schlechter als bei den Jahreswerten und umso schlechter, je weniger trocken es ist (DÖRING 2010). Nur vier Monate werden von allen acht Indizes zu den 24 trockensten gerechnet. Diese vier belegen Rang 1 bis 4. Die Monate auf Rang 5 und 6 werden je siebenmal benannt, die auf den Rängen 7 bis 12 nur noch von fünf oder sechs Indizes, die Monate auf den folgenden Rängen mit einer Ausnahme nur noch von zwei bis vier Indizes. Juli (8-mal) und August (7-mal) sind am häufigsten unter den 24 trockensten Monaten zu finden. Bemerkenswert ist, dass der Juni darunter gar nicht auftaucht.

Wie die Jahreswerte wurden auch die Monatswerte miteinander korreliert (DÖRING 2010). Es gibt hier nur eine einzige gute Korrelation, nämlich zwischen der KWB und der kKWB ($R^2 = 0,9941$). Die bei den Jahreswerten vorhandene gute Korrelation zwischen KWB bzw. kKWB und NVI gibt es bei den Monatswerten nicht mehr. Die Korrelation zwischen dMI und KFZ bzw. RI und KFZ ist noch akzeptabel. Alle anderen Korrelationen sind zu schlecht, um den Wert eines Indexes einigermaßen zuverlässig in den eines anderen umrechnen zu können.

Wegen der schlechten Übereinstimmung der Monatswerte wird auf eine genauere Darstellung dieser Ergebnisse hier verzichtet und dieser Aspekt auch nicht bewertet.

In den Jahreswerten ist der Verlauf einer Trockenheit über das Jahr nicht ablesbar. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der gemittelten Monatswerte der Indizes in den zwölf trockensten Jahren aus Tabelle 4. Der SHC ist nur für April bis Oktober dargestellt, da es in den anderen Monaten keine brauchbaren Werte gibt (TS sehr klein oder 0). Die Werte des HKI wurden mit -1 multipliziert, damit auch bei diesem Index die kleineren Werte eine größere Trockenheit reflektieren.

Die KWB und kKWB zeigen einen fast identischen Verlauf, was nach den bereits vorgestellten Ergebnissen zu erwarten war. Der dMI und die KFZ verlaufen auch relativ ähnlich. Ansonsten unterscheiden sich die Indizes sehr stark in ihrem monatlichen Verlauf, was wegen der oben beschriebenen schlechten Übereinstimmung der Monatswerte ebenfalls nicht verwunderlich ist. Mangels zuverlässiger Vergleichsdaten lässt sich nicht sagen, welcher Index den tatsächlichen Verlauf am besten wiedergibt. Der Index-Verlauf über das Jahr fließt daher nicht in die Bewertung ein.

4.2 Vergleich der Trockenheitsindizes mit Bodenfeuchtwerten

Abbildung 6 vergleicht den gemessenen Bodenfeuchteverlauf in Brandis mit dem Verlauf der Werte der verschiedenen Indizes. Auf die Darstellung der kKWB wird verzichtet, da sich ihr Verlauf (wohl aber die absoluten Werte) nicht von dem der KWB unterscheidet. Der SHC ist hier nur für April bis September dargestellt, da es für die anderen Monate keine brauchbaren Werte gibt. Weiterhin wurden die Werte des HKI wieder mit -1 multipliziert, damit die kleineren Werte eine größere Trockenheit reflektieren.

Die gemessene Bodenfeuchte liegt von Januar bis März auf einem hohen, leicht schwankenden Niveau. Es folgt ein starker Abfall zu einem Minimum im Juni. Danach steigt die Bodenfeuchte zunächst langsam, dann ab September schnell bis Dezember wieder an.

Die KWB (bzw. die kKWB) gibt die hohe Bodenfeuchte von Januar bis März nicht wieder, wohl aber deren Rückgang zum Juni und die relativ große Trockenheit im Juli. Der von der KWB als sehr trocken ausgewiesene August (der übrigens auch bei den anderen Indizes der trockenste Monat ist) sowie der bereits als sehr feucht ausgewiesene September passen nicht zu den Messwerten, die weitere Zunahme der Feuchte zum Dezember dagegen schon. Die KWB reflektiert also zumindest teilweise die Messwerte, insgesamt aber nicht sonderlich gut und erhält dafür nur 1 Punkt.

Alle anderen Trockenheitsindizes zeichnen den Bodenfeuchteverlauf in keiner Weise nach und erhalten jeweils 0 Punkte.

4.3 Vergleich der Trockenheitsindizes mit Ertragsdaten

Leider zeigte keiner der Indizes eine Übereinstimmung mit den Kartoffelerträgen in Halle, nicht einmal eine tendenzielle. Das ist stellvertretend für alle acht in Abbildung 7 anhand des dMI illustriert. Wenn die Indizes nur für die Wachstumsperiode der Kartoffeln (April bis September) berechnet werden, ist die Übereinstimmung genauso schlecht (DÖRING 2010). Dementsprechend erhalten alle acht Indizes 0 Punkte.

Da sich, wie oben erwähnt, auch andere Faktoren außer Trockenheit auf den Ertrag auswirken, ist keine perfekte Beziehung mit den Trockenheitsindizes zu erwarten. Außerdem führt der Umstand, dass die Indizes für Artern (50 km westlich von Halle) berechnet wurden, zu einer gewissen Streuung in den Daten. Trotzdem hätte sich für einen Index, der grundsätzlich den Einfluss von Trockenheit auf den Ertrag

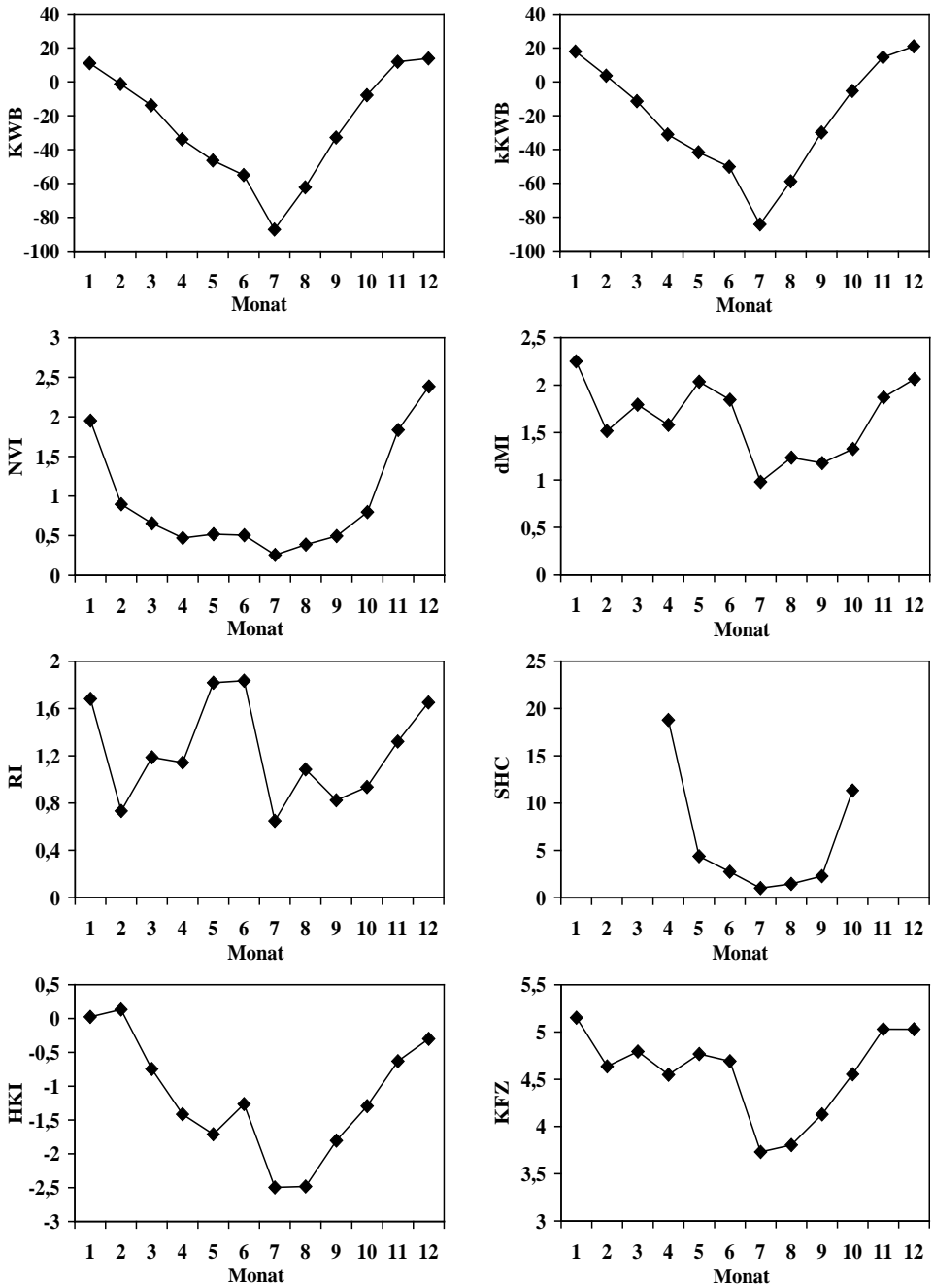


Abb. 5 Verlauf der gemittelten Monatswerte der Trockenheitsindizes in den zwölf trockensten Jahren. Die Abkürzungen sind in Kapitel 2 erklärt.

Fig. 5 Time course of the monthly values of the drought indices, averaged for the twelve driest years. The abbreviations are explained in chapter 2.

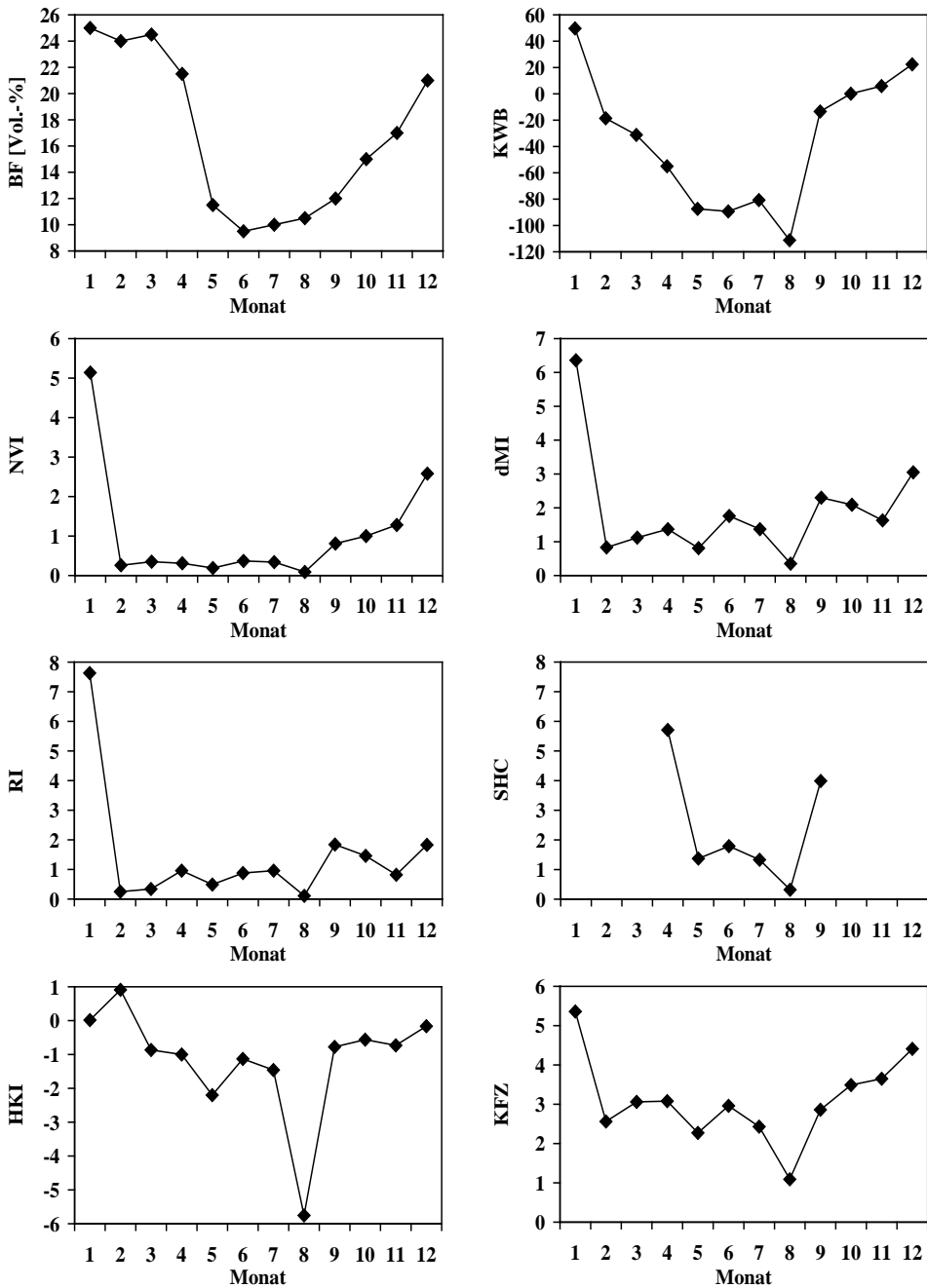


Abb. 6 Vergleich der Bodenfeuchte in 0 – 50 cm Tiefe (BF, links oben) in einem Lysimeter in Brandis im Jahr 2003 mit den Werten der Trockenheitsindizes für den Standort Brandis. Die Abkürzungen sind in Kapitel 2 erklärt.

Fig. 6 Comparison of the soil moisture content in 0 – 50 cm depth (BF, upper left) in a lysimeter at Brandis in 2003 with the values of the drought indices for Brandis. The abbreviations are explained in chapter 2.

erfassen kann, zumindest eine tendenzielle Beziehung zeigen müssen. Abbildung 7 legt somit nahe, dass die hier betrachteten Trockenheitsindizes dies nicht zufriedenstellend können.

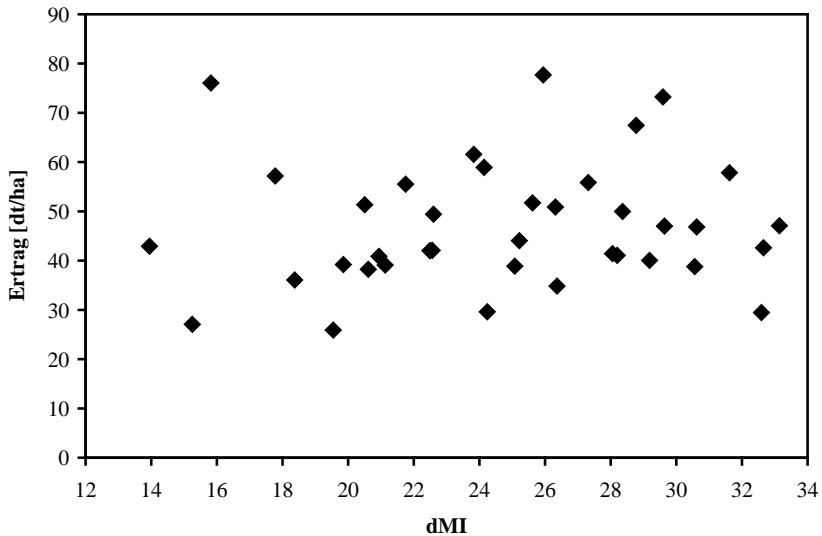


Abb. 7 Vergleich der Kartoffelerträge auf dem Julius-Kühn-Versuchsfeld in Halle von 1970 – 2008 mit den Jahreswerten des de Martonne-Indexes (dMI) für Artern.

Fig. 7 Comparison of potato yields from the Julius-Kühn-Versuchsfeld in Halle for 1970 – 2008 with the annual values of the de Martonne-Index (dMI) for Artern.

4.4 Empfindlichkeit der Trockenheitsindizes gegenüber Änderungen der Eingangswerte

Die Ableitungen der Indizes nach ihren Eingangsparemtern geben die Empfindlichkeit eines Indexes gegenüber Veränderungen in den Eingangsparemtern an. In die KWB gehen die Variablen N und ET_p ein. Somit ergibt sich:

$$\frac{\partial KWB}{\partial N} = \frac{\partial}{\partial N} (N - ET_p) = 1 \quad (9a)$$

$$\frac{\partial KWB}{\partial ET_p} = \frac{\partial}{\partial ET_p} (N - ET_p) = -1 \quad (9b)$$

Die Ableitung nach N und ET_p ist jeweils eine Konstante mit gleichem Betrag (1), aber unterschiedlichem Vorzeichen. Die KWB weist somit gegenüber beiden Parametern die gleiche Empfindlichkeit auf, die nicht von N oder ET_p abhängt. Für die kKWB gelangt man zu den gleichen Ergebnissen. Auf sie wird daher nicht näher eingegangen. Wegen der konstanten Empfindlichkeit erhalten beide Indizes hier 2 Punkte.

Die Ableitungen des NVI nach den Eingangsparemtern lauten:

$$\frac{\partial NVI}{\partial N} = \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{N}{ET_p} \right) = \frac{1}{ET_p} \quad (10a)$$

$$\frac{\partial \text{NVI}}{\partial \text{ET}_p} = \frac{\partial}{\partial \text{ET}_p} \left(\frac{\text{N}}{\text{ET}_p} \right) = -\frac{\text{N}}{\text{ET}_p^2} \quad (10b)$$

Gleichung (10a) besagt, dass beim NVI die Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen in N nicht von N abhängt und für eine gegebene ET_p konstant ist. Mit steigender ET_p nimmt die Empfindlichkeit jedoch ab. Gleichung (10b) besagt, dass die Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen in ET_p mit steigender ET_p in nicht-linearer Form abnimmt und sie zudem mit steigendem N größer wird. Da die Wahrscheinlichkeit einer Trockenheit mit steigender ET_p und abnehmendem N größer wird, ist das Empfindlichkeitsverhalten des NVI genau das Gegenteil von dem was richtig wäre. Er bekommt daher nur 1 Punkt.

Die Ableitungen des dMI nach den Eingangsparametern lauten:

$$\frac{\partial \text{dMI}}{\partial \text{N}} = \frac{\partial}{\partial \text{N}} \left(\frac{\text{N}}{\text{T} + 10} \right) = \frac{1}{\text{T} + 10} \quad (11a)$$

$$\frac{\partial \text{dMI}}{\partial \text{T}} = \frac{\partial}{\partial \text{T}} \left(\frac{\text{N}}{\text{T} + 10} \right) = -\frac{\text{N}}{(\text{T} + 10)^2} \quad (11b)$$

Daraus folgen die gleichen grundsätzlichen Aussagen wie für Gleichung 10a und b, nun allerdings mit T anstelle von ET_p . Für den dMI gibt es daher auch nur 1 Punkt. Da T mit einer additiven Konstante verbunden ist, wirkt sich eine Änderung von T beim dMI nicht so stark aus wie eine Änderung von ET_p beim NVI.

Die Ableitungen des RI nach den Eingangsparametern lauten:

$$\frac{\partial \text{RI}}{\partial \text{N}} = \frac{\partial}{\partial \text{N}} \left(\frac{\text{N}}{\text{T} + 10} \cdot \frac{\text{k}}{120} \right) = \frac{1}{\text{T} + 10} \cdot \frac{\text{k}}{120} \quad (12a)$$

$$\frac{\partial \text{RI}}{\partial \text{T}} = \frac{\partial}{\partial \text{T}} \left(\frac{\text{N}}{\text{T} + 10} \cdot \frac{\text{k}}{120} \right) = -\frac{\text{N}}{(\text{T} + 10)^2} \cdot \frac{\text{k}}{120} \quad (12b)$$

$$\frac{\partial \text{RI}}{\partial \text{k}} = \frac{\partial}{\partial \text{k}} \left(\frac{\text{N}}{\text{T} + 10} \cdot \frac{\text{k}}{120} \right) = \frac{\text{N}}{\text{T} + 10} \cdot \frac{1}{120} \quad (12c)$$

Das Empfindlichkeitsverhalten des RI in Bezug auf N und T ist das Gleiche wie für den dMI. Im RI taucht aber noch die Anzahl der Tage mit > 1 mm Niederschlag auf (k). Die Empfindlichkeit des RI gegenüber N und T steigt mit k. Das ist widersinnig, da mit der Anzahl der Regentage das Trockenheitsrisiko sinkt. Die Empfindlichkeit des RI gegenüber Veränderung in k hängt nicht von k ab (Gleichung 12c), aber steigt mit zunehmendem N und abnehmendem T, was wiederum das Gegenteil von dem ist, was bei einem Trockenheitsindex wünschenswert wäre. Der RI erhält daher ebenfalls nur 1 Punkt.

Die Ableitungen des Seljaninov-Indexes nach den Eingangsparametern lauten:

$$\frac{\partial \text{SHC}}{\partial \text{N}} = \frac{\partial}{\partial \text{N}} \left(\frac{\text{N}}{0,1 \cdot \text{TS}} \right) = \frac{1}{0,1 \cdot \text{TS}} \quad (13a)$$

$$\frac{\partial \text{SHC}}{\partial \text{TS}} = \frac{\partial}{\partial \text{TS}} \left(\frac{\text{N}}{0,1 \cdot \text{TS}} \right) = -\frac{\text{N}}{0,1 \cdot \text{TS}^2} \quad (13b)$$

Für Gleichung 13a und b gelten im Prinzip wieder die gleichen Aussagen wie für Gleichung 10a und b, außer dass anstelle der ET_p hier eine Temperatursumme eingeht (TS). Somit wird auch der SHC nur mit 1 Punkt bewertet. Sei noch angemerkt, dass der SHC auf Temperaturänderungen stärker reagiert als der dMI oder RI, wo sie durch die additive Konstante 10 abgefedert werden.

Im Gegensatz zum dMI, RI und SHC ist beim HKI das Verhältnis zwischen N und T umgekehrt. Folglich ist auch das Empfindlichkeitsverhalten des HKI gegenüber N und T umgekehrt:

$$\frac{\partial \text{HKI}}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{3 \cdot T}{N} \right) = \frac{3}{N} \quad (14a)$$

$$\frac{\partial \text{HKI}}{\partial N} = \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{3 \cdot T}{N} \right) = -\frac{3 \cdot T}{N^2} \quad (14b)$$

Nach Gleichung (14a) hängt beim HKI die Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen in T nicht von T ab und ist für ein gegebenes N konstant. Mit kleiner werdendem N nimmt die Empfindlichkeit jedoch zu. Gleichung (14b) besagt, dass die Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen in N mit abnehmendem N in nicht-linearer Form zunimmt und sie zudem mit steigendem T größer wird. Der HKI reagiert also umso empfindlicher, je höher T und je niedriger N ist. Er ist somit in dieser Beziehung ein idealer Trockenheitsindex und erhält 3 Punkte.

Die KFZ wird mithilfe von N, nFK und Δe berechnet. Die Ableitungen der KFZ nach diesen Variablen lauten:

$$\frac{\partial \text{KFZ}}{\partial N} = \frac{\partial}{\partial N} \lg \left(\frac{N \cdot \sqrt{n\text{FK}}}{1 + \Delta e} + 1 \right) = \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{N + \frac{1 + \Delta e}{\sqrt{n\text{FK}}}} \quad (15a)$$

$$\frac{\partial \text{KFZ}}{\partial n\text{FK}} = \frac{\partial}{\partial n\text{FK}} \lg \left(\frac{N \cdot \sqrt{n\text{FK}}}{1 + \Delta e} + 1 \right) = \frac{1}{2 \cdot \ln 10} \cdot \frac{1}{n\text{FK} + (1 + \Delta e) \cdot \frac{\sqrt{n\text{FK}}}{N}} \quad (15b)$$

$$\frac{\partial \text{KFZ}}{\partial \Delta e} = \frac{\partial}{\partial \Delta e} \lg \left(\frac{N \cdot \sqrt{n\text{FK}}}{1 + \Delta e} + 1 \right) = -\frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{1 + \Delta e + \frac{(1 + \Delta e)^2}{N \cdot \sqrt{n\text{FK}}}} \quad (15c)$$

Nach Gleichung (15a) reagiert die KFZ bei einem gegebenen Δe und einer gegebenen nFK auf Veränderungen im Niederschlag so, dass die Empfindlichkeit mit zunehmendem Niederschlag abnimmt. Dieses Verhalten ist so wie es sein sollte. Da $(1 + \Delta e) / \sqrt{n\text{FK}} \ll N$, spielt dieser Term in der Ableitung bezüglich der Empfindlichkeit von KFZ gegenüber N keine Rolle und wird deshalb hier nicht näher besprochen.

Nach Gleichung (15b) reagiert die KFZ bei einem gegebenen N und einem gegebenen Δe auf Veränderungen in der nFK so, dass die Empfindlichkeit mit zunehmender nFK abnimmt, was ein gewünschtes Verhalten darstellt. Außer bei $N \leq 100$ mm und gleichzeitig großem Δe ist in der Ableitung $(1 + \Delta e) \cdot \sqrt{n\text{FK}} / N \ll n\text{FK}$ und somit ohne Bedeutung für das Empfindlichkeitsverhalten unter mittel-deutschen Verhältnissen, sodass darauf nicht weiter eingegangen wird.

Nach Gleichung (15c) reagiert die KFZ bei einem gegebenen N und einer gegebenen nFK auf Veränderungen in Δe so, dass die Empfindlichkeit mit zunehmendem Δe abnimmt, was das Gegenteil von dem ist, was richtig wäre. In dieser Ableitung ist der Term $(1 + \Delta e)^2 / (N \cdot \sqrt{n\text{FK}}) \ll \Delta e$ (außer bei $N \leq 100$ mm

und gleichzeitig großem Δe) und beeinflusst somit das Empfindlichkeitsverhalten gegenüber Δe nicht wesentlich. Er wird daher nicht weiter betrachtet.

In Bezug auf N und nFK verhält sich die KFZ korrekt: Sie zeigt eine größere Empfindlichkeit, wenn N oder nFK abnehmen. In Bezug auf Δe ist es umgekehrt. Die KFZ erhält deswegen nur eine mittlere Bewertung (2 Punkte).

Aus den Empfindlichkeitsbetrachtungen folgt, dass es diesbezüglich sinnvoller ist einen Trockenheitsindex als ein Verhältnis von ET_p , T oder TS zu N zu gestalten (z.B. HKI) als umgekehrt (z.B. NVI bzw. dMI, RI und SHC). Die Schwäche der vier letztgenannten Indizes in Bezug auf die Empfindlichkeit lässt sich aber leicht beheben, indem man das Verhältnis der Eingangsparameter invertiert.

4.5 Aufwand zur Ermittlung der Trockenheitsindizes

Für die Berechnung der KWB, kKWB und des NVI sind Niederschlag und ET_p notwendig. Der Niederschlag ist eine leicht zugängliche Größe. Für die Berechnung der ET_p nach Penman-Wendling werden neben der Temperatur auch Globalstrahlung, Wind und Luftfeuchtigkeit gebraucht, sodass die Anwendung dieser drei Indizes eine aufwändige Datenbeschaffung nach sich zieht. Für den Ermittlungsaufwand erhalten die KWB, kKWB und der NVI daher nur je 1 Punkt. (Außer der Penman-Wendling Formel gibt es noch andere zur Berechnung der ET_p , aber alle benötigen relativ schwer zu beschaffende Daten.)

Für den dMI und HKI werden nur Niederschlag und Temperatur verwendet, die relativ leicht zugänglich sind. Für den Ermittlungsaufwand erhalten sie daher je 3 Punkte.

Auch der RI und SHC erfordern nur Daten zu Niederschlag und Temperatur. Allerdings muss für den RI zusätzlich die Anzahl der Niederschlagstage mit $\geq 1,0$ mm Niederschlag ermittelt werden. Der SHC erfordert die Temperatursumme > 10 °C. Beides ist ein erhöhter Aufwand gegenüber der Berechnung des dMI oder HKI, weil dazu immer Tageswerte herangezogen werden müssen, selbst wenn nur Monats- oder Jahreswerte der Indizes berechnet werden sollen. Beim dMI und HKI können direkt Monats- bzw. Jahreswerte für N und T eingesetzt werden. Bezüglich des Ermittlungsaufwands werden dem RI und SHC deshalb nur 2 Punkte zugesprochen.

Für die KFZ sind neben der einfach zu beschaffenden Größe Niederschlag noch die nFK und Δe notwendig. Die nFK für einen Boden ist relativ leicht aus der bodenkundlichen Literatur in Erfahrung zu bringen (z.B. AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Dagegen gehört Δe zu den aufwändigeren Größen der Recherche. Die KFZ wird daher hier ebenfalls mit 2 Punkten bewertet.

4.6 Zusammenfassende Bewertung der Trockenheitsindizes

Die vergebene Punktzahl für die verschiedenen Kategorien sowie eine zusammenfassende Bewertung der einzelnen Trockenheitsindizes sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die beste Gesamtbewertung erzielt der HKI mit 9 Punkten.

Wie oben angemerkt, lässt sich das Empfindlichkeitsverhalten des NVI, dMI, RI und SHC richtig stellen, indem man diese Indizes invertiert. Sie erhalten dann 3 Punkte für dieses Kriterium, anstatt wie vorher nur 1 Punkt. Auch dann liegt der HKI mit unverändert 9 Punkten an der Spitze, die nun aber auch der dMI erreicht. Die verbleibenden sechs Indizes haben dann je 7 Punkte. Dieses schlechtere Abschneiden beruht im Wesentlichen darauf, dass der Ermittlungsaufwand für sie relativ hoch ist. Für die Erfassung von Trockenheit an sich sind sie aber nicht schlechter als der HKI (vgl. Kapitel 4.1).

Nach dieser Auswertung ist der HKI der Index der Wahl für mitteldeutsche Verhältnisse. Sie zeigt jedoch auch, dass alle Indizes große Schwächen haben und nicht das beste Mittel sind, um Trockenheit zu beschreiben.

Tab. 7 Bewertung der Trockenheitsindizes. Die Abkürzungen sind in Kapitel 2 erklärt.

Tab. 7 Evaluation of the drought indices. The abbreviations are explained in chapter 2.

	KWB	kKWB	NVI	dMI	RI	SHC	HKI	KFZ
Übereinstimmung	3	3	3	3	2	2	3	3
Vgl. Bodenfeuchte	1	1	0	0	0	0	0	0
Vgl. Ertragsdaten	0	0	0	0	0	0	0	0
Empfindlichkeit	2	2	1	1	1	1	3	2
Ermittlungsaufwand	1	1	1	3	2	2	3	2
Gesamtbewertung	7	7	5	7	5	5	9	7
<i>mit korrigierter Empfindlichkeit</i>	7	7	7	9	7	7	9	7

5 Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, verschiedene Trockenheitsindizes hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung landwirtschaftlicher Trockenheit in Mitteldeutschland zu testen.

Einige der Indizes nutzen die Lufttemperatur als Substitut für die ET_p , da Temperaturdaten leichter zu bekommen sind. Wie in Abbildung 4 gezeigt, gibt es zwischen diesen beiden Variablen eine annehmbare Korrelation, sodass die Substitution vertretbar ist. Andererseits ist die Korrelation aber auch nicht besonders gut, sodass mit der ET_p eigentlich genauere Aussagen zu erwarten wären. Die Indizes, in denen die ET_p verwendet wird, schneiden hier allerdings nicht besser ab als diejenigen, die stattdessen die Temperatur bzw. Δe einsetzen.

Kapitel 4.4 hat gezeigt, dass ein richtigeres Empfindlichkeitsverhalten erzielt wird, wenn ein Index das Verhältnis T/N bzw. ET_p/N verwendet, wie der HKI, anstatt das umgekehrte Verhältnis, wie dMI, RI, SHC bzw. NVI. Diese Unzulänglichkeit lässt sich jedoch leicht lösen, wenn man den Berechnungsweg der eben genannten Indizes invertiert, also z.B. den dMI nun berechnet als: $dMI_{neu} = (T + 10)/N$.

Bei den Jahreswerten stimmen die Indizes bei der Ausweisung der 12 trockensten Jahre gut überein. Demnach wären alle eine gleich gute Wahl, wenn es um die Ausweisung trockener Jahre durch Jahresindizes geht. Allerdings korrelieren der RI sowie SHC etwas schlechter mit den anderen Indizes. Für $k = 120$ entspricht der RI dem dMI. Die relativ schlechte Korrelation des RI mit dem dMI (und den anderen Indizes) ist daher offensichtlich auf den Parameter k zurückzuführen. Der SHC ist formal das Reziproke des HKI (ein Temperaturterm multipliziert mit einer Konstanten, geteilt durch eine Niederschlagssumme). Dass der SHC dennoch nur relativ schlecht mit dem HKI (und auch den anderen Indizes) korreliert, kann somit nur daran liegen, dass er eine Temperatursumme statt einer Mitteltemperatur verwendet.

In dieser Arbeit wurde angenommen, dass eine gute Korrelation mit anderen Indizes ein Ausdruck der Qualität des fraglichen Indexes ist. Wenn eine solche Übereinstimmung nicht vorliegt, weil der fragliche Index einen zusätzlichen (k im Fall des RI) oder andersartigen (TS im Fall des SHC) Parameter enthält, kann das auch bedeuten, dass die anderen Indizes weniger zuverlässig sind. Allerdings haben sowohl der RI als auch der SHC den Bodenfeuchteverlauf und die Erträge nicht besser beschrieben als die anderen Indizes. Der Parameter k bzw. TS hat also nicht zu einem präziseren Index geführt.

Ein guter Trockenheitsindex sollte den zeitlichen Verlauf einer Trockenheit, so wie er im Bodenwasserhaushalt und letztlich im Ertrag zum Ausdruck kommt, gut wiedergeben. Keiner der hier beleuchteten Indizes hat das zufriedenstellend getan. Das wirft Zweifel auf, ob diese und ähnliche Trockenheitsindizes überhaupt dazu in der Lage sind. Dafür gibt es einen triftigen Grund: Außer der KFZ berücksichtigt keiner der Indizes die Fähigkeit des Bodens Wasser zu speichern. Das ist aber wichtig, denn im Boden gespeichertes Wasser kann ein vorübergehendes Niederschlagsdefizit abpuffern. Eine gewisse Zeit ohne Regen muss somit nicht zu Trockenstress für eine Pflanze führen, wenn genug verfügbares Wasser im Boden ist.

Daher ist letztlich jeder Trockenheitsindex, der die im Boden gespeicherte Wassermenge nicht oder nicht richtig erfasst, mangelhaft.

Die KFZ enthält die nutzbare Feldkapazität (nFK) des Bodens, die das mögliche Wasserspeichervermögen des Bodens reflektiert. Sie ist für einen gegebenen Boden konstant. Die tatsächlich im Boden gespeicherte Wassermenge ändert sich jedoch ständig: Bei Trockenheit nimmt sie ab, bei Regen nimmt sie zu. Das kommt in der nFK nicht zum Ausdruck, sodass sie in der KFZ letztlich nur den Charakter einer multiplikativen Konstante hat. Im Vergleich zu den anderen Indizes ist die Verwendung der nFK in der KFZ dennoch ein Fortschritt, denn sie bringt zumindest zum Ausdruck, dass Böden mit hoher nFK weniger von Trockenheit betroffen sind als Böden mit geringer nFK. Wie die Auswertung hier zeigt, genügt die Verwendung der nFK in dieser Form jedoch nicht, um einen brauchbaren Trockenheitsindex zu erzeugen.

Für Mitteldeutschland wird laut Modellrechnungen in Zukunft ein trockeneres Klima erwartet. Trockenheit wird daher in den kommenden Jahren für die agrarmeteorologische Beratung zunehmend an Bedeutung gewinnen (MÜLLER et al. 2008b). Zum einen gilt es grundsätzliche Entscheidungen zu treffen, z.B. wann und wo welche Kulturen entsprechend ihres Wasserbedarfes angebaut werden können, welche Trockenheitsresistenzen für eine bestimmte Region erforderlich sind und ob ein Zwischenfruchtanbau unter den zu erwartenden klimatischen Bedingungen ratsam ist. Zum anderen gilt es in einer gegebenen Wachstumsperiode das Entstehen von Trockenheit in der Landwirtschaft rechtzeitig zu erkennen, damit Gegenmaßnahmen ergriffen werden können, um völlige Ernteverluste oder unnötige Risikokosten zu vermeiden. Bewässerung wird zukünftig wieder mehr Bedeutung erhalten, wenn durch häufigere Trockenheiten immer mehr Ernteverluste drohen.

Bei der Berechnung von Trockenheitsindizes müssen relativ lange Zeiträume betrachtet werden, z.B. ein Monat. Für kürzere Zeiträume, wie etwa Dekaden oder Tage, schwanken die Indexwerte zu stark, da sie im Wesentlichen als ein Verhältnis aus Niederschlag und Temperatur bzw. ET_p berechnet werden und vor allem die Niederschläge über kürzere Zeiträume stark schwanken. Monatswerte sind aber für die agrarmeteorologische Beratung und Vorhersage nur bedingt nutzbar, da sie wenig über die aktuellen Verhältnisse aussagen. Das ist ein weiterer Nachteil den alle Trockenheitsindizes haben.

Es wird also ein Werkzeug gebraucht, mit dem landwirtschaftliche Trockenheit korrekt erfasst werden kann. Die hier betrachteten Trockenheitsindizes sind relativ leicht zu berechnen. Darin liegt ihr Charme. Sie können aber offensichtlich den Verlauf einer Trockenheit, die im Verlauf der Bodenfeuchte und letztlich in den Erträgen zum Ausdruck kommt, nicht richtig widerspiegeln. Dazu muss wohl auf aufwändigere Methoden zurückgegriffen werden.

Es gibt heute zahlreiche Computermodelle unterschiedlicher Komplexität, die den Bodenwasserhaushalt und die damit einhergehenden Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag simulieren. Mit den hier verwendeten Daten sollte in einer weiteren Studie untersucht werden, ob solche Modelle Trockenheit und ihre Auswirkungen besser erfassen bzw. ab welchem Grad der Komplexität. Ein wichtiger Punkt dabei ist die zeitliche Auflösung der Modelle. Je besser die Auflösung, umso genauer werden trockene Zeiträume erfasst, aber desto höher ist der Aufwand an Daten und für die Berechnung. Für die agrarmeteorologische Beratung und Vorhersage sind Modelle gut geeignet, die in Tagesschritten arbeiten und nicht nur den Bodenwasserhaushalt beschreiben, sondern auch seine Auswirkungen auf die Entwicklung des Pflanzenbestandes (und umgekehrt).

Je komplexer ein Modell ist, desto mehr Parameter werden darin in der Regel benötigt. Außerdem sind die Ergebnisse aus solchen Modellen meist auf einen konkreten Standort bezogen und nicht auf eine größere Region übertragbar, es sei denn die Bedingungen (u.a. Boden, angebaute Frucht, Wetter) sind dort überall gleich. Um Aussagen für ein größeres Gebiet zu erhalten, müssen daher meist zusätzliche Berechnungen für anders ausgeprägte Standorte in diesem Gebiet gemacht werden. Mit einem komplexen Modell Aussagen für eine Region zu treffen ist also sehr aufwändig und oft auch gar nicht möglich, wenn nicht für alle Teilgebiete die notwendigen Daten für alle Eingangsparameter vorliegen. Komplexe Modelle sind dann auch nicht unbedingt besser als Trockenheitsindizes, die hier allerdings die in sie gesetzten Erwartungen nicht erfüllen konnten.

Das primäre Ziel muss sein, eine Methode zu finden, die für die landwirtschaftliche Beratung tauglich ist, also letztlich die Auswirkungen von Trockenheit auf die Erträge korrekt beschreiben kann. Als sekundäres Ziel kann man dann versuchen, diese Methode so einfach wie möglich zu gestalten. Wie die hier vorliegende Studie gezeigt hat, sind Trockenheitsindizes zu einfach um das primäre Ziel zu erfüllen.

6 Zusammenfassung

DÖRING, S., DÖRING, J., BORG, H., BÖTTCHER, F.: Vergleich von Trockenheitsindizes zur Nutzung in der Landwirtschaft unter den klimatischen Bedingungen Mitteldeutschlands. - *Hercynia N. F.* 44 (2011): 145 – 168.

Trockene Bedingungen können unter Umständen zu erheblichen Mindererträgen für die Landwirtschaft führen. Um trockene Bedingungen zu quantifizieren, werden in der agrarmeteorologischen Beratung häufig sogenannte Trockenheitsindizes herangezogen. Es gibt eine Vielzahl solcher Indizes, von denen in dieser Arbeit acht auf ihre Tauglichkeit für die Quantifizierung landwirtschaftlicher Trockenheit in Mitteldeutschland am Beispiel des Standorts Artern geprüft wurden. Artern ist für das mitteldeutsche Trockengebiet exemplarisch und wegen seiner für Deutschland sehr niedrigen jährlichen Niederschlagsmenge für die Untersuchungen von Trockenheitsindizes prädestiniert. Die acht Indizes wurden nach verschiedenen Kriterien betrachtet.

Der Index nach Harlfinger und Knees erzielte die beste Gesamtbewertung, wobei die anderen Indizes für die Erfassung von Trockenheit an sich auch nicht schlechter sind, aber aufwändiger zu beschaffende Daten benötigen oder invertiert werden müssen, um das Empfindlichkeitsverhalten zu verbessern. Die hier vorgelegte Untersuchung zeigt, dass alle Indizes große Schwächen haben und kein brauchbares Mittel sind, um die Auswirkungen von Trockenheit zu beschreiben. Keiner konnte den zeitlichen Verlauf einer Trockenheit, reflektiert durch den Verlauf der Bodenfeuchte und letztlich durch ihren Einfluss auf den Ertrag, gut wiedergeben. Der Grund dafür ist, dass in keinem der hier betrachteten Indizes die pflanzenverfügbare Wassermenge im Boden angemessen berücksichtigt wird. Diese ist aber wichtig, denn im Boden gespeichertes Wasser kann ein vorübergehendes Niederschlagsdefizit abpuffern. Daher ist letztlich jeder Trockenheitsindex, der die im Boden gespeicherte Wassermenge nicht oder nicht richtig erfasst, mangelhaft.

Für Mitteldeutschland wird in Zukunft, speziell während der Vegetationszeit, ein trockeneres Klima erwartet. Trockenheit wird daher in den kommenden Jahren für die agrarmeteorologische Beratung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Dafür wird ein Werkzeug gebraucht, mit dem landwirtschaftliche Trockenheit korrekt erfasst werden kann. Es gibt zahlreiche Computermodelle unterschiedlicher Komplexität, die den Bodenwasserhaushalt und die damit einhergehenden Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag simulieren. In einer weiteren Studie sollte daher untersucht werden, ob solche Modelle landwirtschaftliche Trockenheit und ihre Auswirkungen besser erfassen als Trockenheitsindizes bzw. ab welchem Grad der Komplexität.

7 Literaturverzeichnis

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (Ed.) (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Auflage. - Schweizerbart, Stuttgart.
- BAGROV, N. A. (1992): Drought and its definition. - *Soviet Meteorology and Hydrology* 9: 53 – 58.
- BUCHNER, W., MÜLLER, J., SOURELL, H. (2006): *Grundlagen und Anwendung der Agrarmeteorologie im Pflanzenbau*. - In: LÜTKE ENTRUP, N., OEHMICHEN, J. (Ed.): *Lehrbuch des Pflanzenbaues*, Band 1: Grundlagen. AgroConcept, Bonn: 621 – 711.
- DE MARTONNE, E. (1926): Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. - *La Météorologie* 2: 449 – 458.
- DIEPENBROCK, W., FISCHBECK, G., HEYLAND, K.-U., KNAUER, N. (1999): *Spezieller Pflanzenbau*, 3. Aufl. - Ulmer, Stuttgart.
- DÖRING, S. (2010): Vergleich von Trockenheitsindizes zur Nutzung in der Landwirtschaft unter den klimatischen Bedingungen Mitteldeutschlands. - *Dipl.arb.*, Univ. Halle-Wittenberg.

- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238. - Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- FARAGÓ, T., KOZMA, E., NEMES, C. (1989): Drought indices in meteorology. - *Ideojaras* 93: 45 – 60.
- FLEIG, A. K., TALLAKSEN, L. M., HISDAL, H., DEMUTH, S. (2006): A global evaluation of streamflow drought characteristics. - *Hydrology and Earth System Sciences* 10: 535 – 552.
- GIBBS, W. J. (1975): Drought: its definition, delineation and effects. - In: Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva (Ed.): *Drought. WMO Special Environmental Report 5*: 11 – 39.
- HARLFINGER, O., KNEES, G. (1999): *Klimahandbuch der Österreichischen Bodenschätzung, Teil 1: Klimatographie*. - Wagner, Innsbruck.
- HOUNAM, C. E., BURGOS, J. J., KALIK, M. S., PALMER, W. C., RODDA, J. (1975): Drought and agriculture: Report of the CAgM working group on the assessment of drought. - WMO Technical Note 138. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva.
- KUHNKE, A. (1936): Die Abhängigkeit des Pflanzenertrages von der Wasserverdunstung. - *Schr. Königsberger Gelehrten Ges.* 13: 59 – 158.
- MAYBANK, J., BONSAI, B., JONES, K., LAWFOR, R., O'BRIEN, E. G., RIPLEY, E. A., WHEATON, E. (1995): Drought as a natural disaster. - *Atmosphere-Ocean* 33: 195 – 222.
- MESHCHERSKAYA, A. V., BLAZHEVICH, V. G. (1997): The drought and excessive moisture indices in a historical perspective in the principal grain-producing regions of the former Soviet Union. - *J. Climate* 10: 2670 – 2682.
- METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST DER DDR (Ed.) (1953): *Klimaatlas für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik, Erläuterungen*. - Akademie-Verlag, Berlin.
- MÜLLER, J., BÖTTCHER, F., SCHMIDT, M. (2008a): Bestimmung bodenartabhängiger Klimafeuchtezahlen für verschiedene Standorte in mittleren und nordöstlichen Regionen Deutschlands. - *Hercynia N.F.* 41: 189 – 200.
- MÜLLER, J., BÖTTCHER, F., SCHMIDT, M. (2008b): Bodenwasserhaushaltstrends im Trockengebiet und Konsequenzen für die Landnutzung. - *Bernburger Agrarber.*, H. 1. Landesanstalt f. Landwirtschaft u. Gartenbau, Bernburg: 19 – 35.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1996): *Klimadaten von Deutschland, Zeitraum 1961-1990*. - Selbstverlag Dt. Wetterdienstes, Offenbach.
- REICHEL, E. (1928): Der Trockenheitsindex, insbesondere für Deutschland. - In: *Preußisches Meteorologisches Institut (Ed.): Bericht über die Tätigkeit des Preußischen Meteorologischen Instituts 1928*. Springer, Berlin: 84 – 105.
- REICHEL, E. (1938): Die Klimaunterlagen für die Reichsbodenschätzung und ihre Anwendung. - *Z. angew. Meteorologie* 55: 69 – 82.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. - *Ber. Dt. Wetterdienstes* 194. Selbstverlag Dt. Wetterdienstes, Offenbach.
- SCHREIBER, D. (1973): Entwurf einer Klimaeinteilung für landwirtschaftliche Belange. - *Bochumer Geographische Arbeiten, Sonderreihe, Band 3*. Schöningh, Paderborn.
- SEEMAN, J., CHRIKOV, Y. I., LOMAS, J., PRIMANT, B. (1979): *Agrometeorology*. - Springer, Berlin.
- SELJANINOV, A. (1928): On agricultural climate valuation (in Russian). - *Proceedings Agricultural Meteorology* 20: 165 – 177.
- TAHIRO, E. (2002): Untersuchungen von Sommerweizengenotypen unterschiedlicher Herkunft auf Hitze- und Trockenstresstoleranz. - *Diss., Univ. Halle-Wittenberg*.
- WALTER, H., LIETH, H. (1960): *Klimadiagramm-Weltatlas*. - Fischer, Jena.
- WILHITE, D. A. (2000): *Drought: a global assessment. Volume I*. - *Routledge Hazards and Disasters Series*. Routledge, London.

Manuskript angenommen: 5. September 2011

Anschrift der Autoren:

Sandra Döring, Dr. Jürgen Döring, Prof. Dr. Heinz Borg
 Naturwissenschaftliche Fakultät III der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Julius-Kühn-Str. 23, D - 06112 Halle (Saale)
 E-Mail: lkkt@landw.uni-halle.de

Falk Böttcher

Deutscher Wetterdienst, Niederlassung Leipzig, Kärnerstr. 68, D - 04288 Leipzig
 E-Mail: falk.boettcher@dwd.de