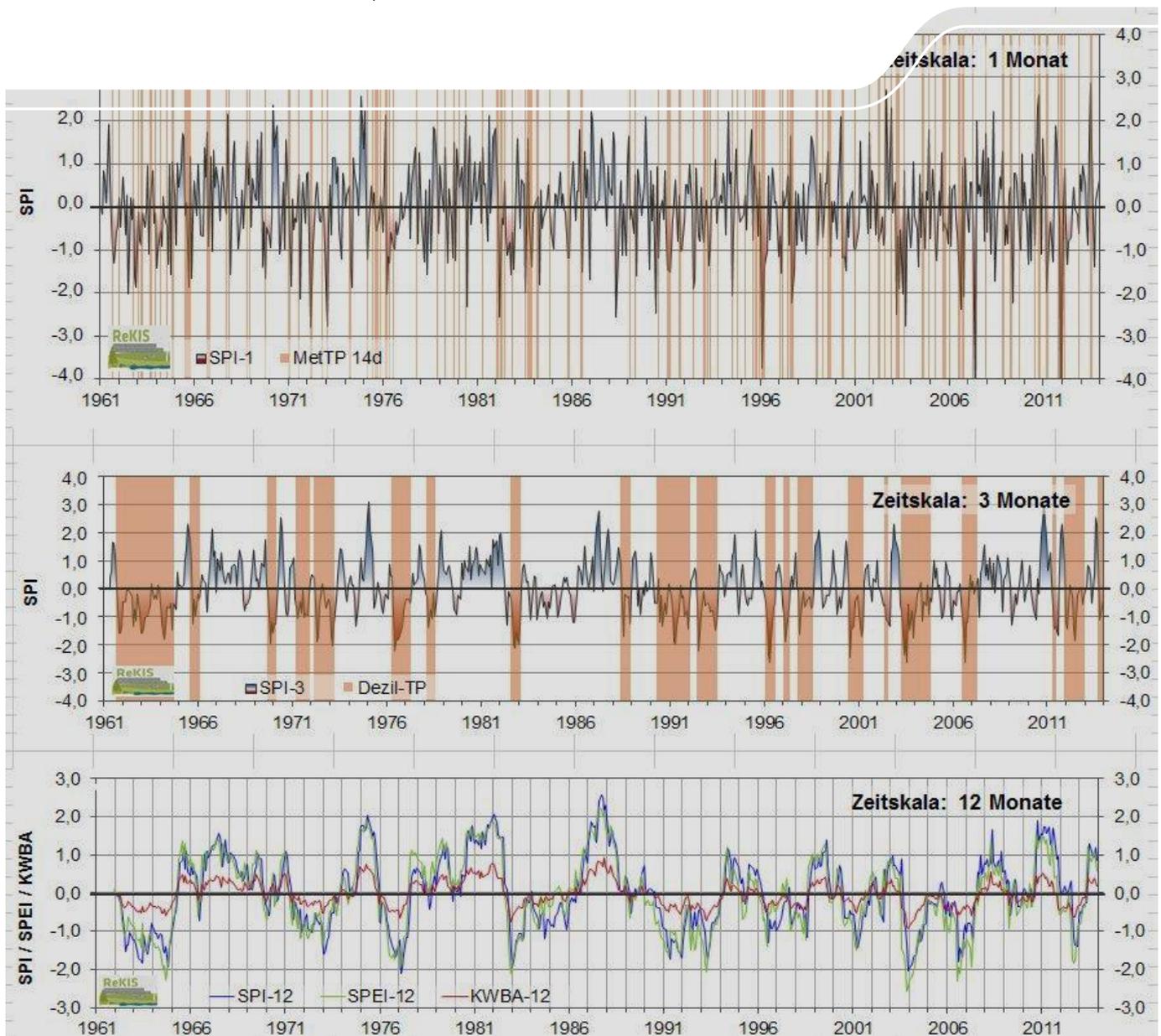


Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit

Schriftenreihe, Heft 7/2015



Untersuchungen zur Erfassung und Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit

Prof. Dr. Christian Bernhofer, Dr. Stephanie Hänsel, Andrea Schaller, Thomas Pluntke

Inhalt

1	Einleitung	13
2	Trockenheits- bzw. Dürredefinition	14
2.1	Allgemeine Definitionsansätze	14
2.2	Funktionale bzw. disziplinäre Dürre-Typen	16
2.2.1	Meteorologische Dürre	16
2.2.2	Land- und forstwirtschaftliche Dürre.....	16
2.2.3	Hydrologische Dürre.....	17
2.2.4	Grundwasser-Dürre.....	19
2.2.5	Sozioökonomische Dürre	19
2.3	Ebenen von Dürre	20
2.4	Anmerkungen zu den Begrifflichkeiten	21
3	Dürreindizes	22
3.1	Einsatzzweck.....	22
3.2	Universelle Indizes?	23
3.3	Kategorisierung der Dürreindizes	24
3.4	Meteorologische Dürreindizes	25
3.4.1	Historische Definitionsansätze	25
3.4.2	Temperaturabgeleitete Indizes	26
3.4.3	Rein auf Niederschlagsdaten basierende Ansätze.....	26
3.4.4	Bewertung niederschlagsbasierter Indikatoren	35
3.4.5	Indizes basierend auf Niederschlags- und Temperaturdaten (bzw. der potenziellen Verdunstung)	36
3.4.6	Komplexere hydrometeorologische Indizes.....	37
3.5	Landwirtschaftliche Dürreindizes.....	38
3.5.1	Motivation.....	38
3.5.2	Überwiegend auf meteorologischen Eingangsdaten beruhende Ansätze	45
3.5.3	Auf Wasserbilanzüberlegungen beruhende Indizes	45
3.5.4	Indizes zur Beschreibung der Bodenfeuchte	46
3.6	Hydrologische Dürreindizes	48
3.7	Auf Fernerkundungsdaten basierende Indizes	53
3.8	Kombinierte Indizes.....	57
3.9	Vergleichsstudien zu meteorologischen Dürreindizes	59
3.10	Dürremonitoringzentren.....	61
3.11	Software-Packages	62
4	Datengrundlage	62
4.1.	Eingangsdaten der Dürreindexberechnungen	62
4.2.	Eingangsdaten der Starkniederschlagsanalysen	65
5	Methoden	66
5.1.	Modell METVER	66
5.2.	Berechnete Dürreindizes.....	67
5.3.	Analyse des Starkniederschlagsverhaltens	68
6	Ergebnisse	69
6.1	Charakterisierung von Trockenheit in Sachsen	69
6.2	Vergleich und Bewertung ausgewählter Dürreindizes	74
6.3	Bodenfeuchtemodellierungen mit METVER	80
6.4	Starkregen.....	87
7	Bewertung und Ausblick	110
8	Zusammenfassung	112
9	Literaturverzeichnis	114
10	Anhang	135

Anlage 1:	Beschreibung ausgewählter meteorologischer Dürreindizes	136
Anlage 2:	Beschreibung ausgewählter landwirtschaftlicher Dürreindizes	159
Anlage 3:	Hydrologische Dürreindizes	168
Anlage 4:	Kombinierte Dürreindizes.....	171
Anlage 5:	Wesentliche Inhalte und Ergebnisse bekannter Dürrereviews und Vergleichsstudien	178
Anlage 6:	Übersicht über einige nationale, regionale und kontinentale Dürremonitoringzentren	188
Anlage 7:	Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes für die auf Jahresbasis akkumulierten Werte (oberste Teilabbildung) sowie die Zeitskalen 1 und 3 Monate.....	194
Anlage 8:	Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes für die Zeitskalen 12 und 24 Monate.....	199
Anlage 9:	Zeitlicher Verlauf der a) Jahreswerte (außer HTC) von metTP, WSDI, SPI-1, SPEI-1 und HTC und b) der SPI-1, SPEI-1 und HTC-Werte für den Zeitraum Mai bis Sept.; Station Görlitz	203
Anlage 10:	Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte (aus Monats- bzw. Tageswerten gemittelte Werte) von SPI-1 und SPEI-1 sowie der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierte Bodenfeuchte (BF in % der nutzbaren Feldkapazität nFk) an vier Standorten im Zeitraum 1961–2013.....	204
Anlage 11:	Vergleich des Jahresgangs der mittels METVER (Winterweizen) modellierten Bodenfeuchte (in %nFk) an fünf Standorten mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) sowie Niederschlagstagen ($\geq 5/10/20$ mm = P5/10/20mm) drei ausgewählter Trockenjahre (1972).....	205

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitliche Abfolge eine Dürre.....	18
Abbildung 2:	Illustration der Berechnung des Gesamtwasserdefizites S aus der Dürreandauer D und der Dürrestärke M (KEYANTASH & DRACUP 2002)	50
Abbildung 3:	Geländehöhen und Naturräumliche Einheiten Sachsen (aus BERNHOFER et al. 2008).....	64
Abbildung 4:	Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes an der Station Dresden-Klotzsche für die auf Jahresbasis akkumulierten Werte (oben) und die Zeitskalen 1 und 3 Monate	72
Abbildung 5:	Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes an der Station Dresden-Klotzsche für die Zeitskalen 12 und 24 Monate mit Kennzeichnung der in Abbildung 6 dargestellten „Lupen“ausschnitte	73
Abbildung 6:	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der drei Feuchteanomalienindizes SPI, SPEI und KWB-A auf den Zeitskalen 12 (oben) und 24 (unten) Monate mit den über die gleichen Zeitabschnitte gemittelten Temperaturanomalien Tm-A und normierten Evapotranspirationsanomalien ETP-A in den Lupenzeitabschnitten 1 (01/1962–12/1966; links) und 2 (01/2005–12/2009; rechts)	77
Abbildung 7:	Scatterplots der Differenz zwischen SPI-1 und SPEI-1 gegenüber der Temperaturanomalie an der Station Dresden-Klotzsche inklusive Korrelationskoeffizienten nach Pearson; Zeitraum 1961–2013.....	78
Abbildung 8:	Zeitlicher Verlauf der a) Jahreswerte (außer HTC) von metTP, WSDI, SPI-1, SPEI-1 und HTC und b) der SPI-1, SPEI-1 und HTC-Werte für den Zeitraum Mai bis Sept.; Station Dresden-Klotzsche	79
Abbildung 9:	Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte (aus Monats- bzw. Tageswerten gemittelte Werte) von SPI-1 und SPEI-1 sowie der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierte Bodenfeuchte (BF in % der nutzbaren Feldkapazität nFk) am Standort Dresden-Klotzsche im Zeitraum 1961–2013	80
Abbildung 10:	Korrelation der Monatswerte von SPI mit denen der Bodenfeuchte (als Feldkapazität Fk in % der nutzbaren Feldkapazität), Standort: Dresden-Klotzsche, Zeitraum: 1967–2013.....	82
Abbildung 11:	Zeitlicher Verlauf der Bodenfeuchte (als Prozent der nutzbaren Feldkapazität %nFk) an den Stationen Dresden-Klotzsche, Wittenberg und Fichtelberg in täglicher Auflösung und Vergleich mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP); Zeitraum 1967–2013.....	84
Abbildung 12:	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierten Bodenfeuchte (in %nFk) im Trockenjahr 2003 an den Standorten Dresden-Klotzsche, Görlitz, Wittenberg, Chemnitz und Fichtelberg mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) und Tagen mit mind. 5 (P5mm), 10 (P10mm) bzw. 20 mm (P20mm) Niederschlagshöhe.....	85
Abbildung 13:	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierten Bodenfeuchte (in %nFk) im Trockenjahr 1996 an den Standorten Dresden-Klotzsche, Görlitz, Wittenberg, Chemnitz und Fichtelberg mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) und Tagen mit mind. 5 (P5mm), 10 (P10mm) bzw. 20 mm (P20mm) Niederschlagshöhe.....	86
Abbildung 14:	Flächenhafte Verteilung von Starkregen R80p in Sachsen für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010, Jahr: Regenmenge von Starkregen R80p (mm) (oben), kumulative Überschreitungstage von Starkregenereignissen R80p (d) (Mitte), mittlere Intensität pro Starkregenereignis R80p (mm/Ereignis) (unten)	94
Abbildung 15:	Flächenhafte Verteilung für die Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R80p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (Isolinien: Menge StarkregenR80p in mm); Box-Plot zu den flächenhaften Verteilungen	95
Abbildung 16:	Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R80p für die Transekte West-Ost und Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte	96
Abbildung 17:	Flächenhafte Verteilung von Starkregen R90p in Sachsen für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010, Jahr: Regenmenge von Starkregen R90p (mm) (oben), kumulative Überschreitungstage von Starkregenereignissen R90p (d) (Mitte), mittlere Intensität pro Starkregenereignis R90p (mm/Ereignis) (unten)	97

Abbildung 18:	Flächenhafte Verteilung für die Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R90p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (Isolinien: Menge Starkregen R90p in mm); Box-Plot zu den flächenhaften Verteilungen	98
Abbildung 19:	Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R90p für die Transekte West-Ost und Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte	99
Abbildung 20:	Flächenhafte Verteilung von Starkregen R95p in Sachsen für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010, Jahr: Regenmenge von Starkregen R95p (mm) (oben), kumulative Überschreitungstage von Starkregenereignissen R95p (d) (Mitte), mittlere Intensität pro Starkregenereignis R95p (mm/Ereignis) (unten)	100
Abbildung 21:	Flächenhafte Verteilung für die Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R95p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (Isolinien: Menge Starkregen R95p in mm); Box-Plot zu den flächenhaften Verteilungen	101
Abbildung 22:	Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R95p für die Transekte West-Ost und Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte	102
Abbildung 23:	Flächenhafte Verteilung von Starkregen R99p in Sachsen für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010, Jahr: Regenmenge von Starkregen R99p (mm) (oben), kumulative Überschreitungstage von Starkregenereignissen R99p (d) (Mitte), mittlere Intensität pro Starkregenereignis R99p (mm/Ereignis) (unten)	103
Abbildung 24:	Flächenhafte Verteilung für die Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R99p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (Isolinien: Menge Starkregen R99p in mm); Box-Plot zu den flächenhaften Verteilungen	104
Abbildung 25:	Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R99p für die Transekte West-Ost und Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte	105
Abbildung 26:	Box-Whisker-Plot zur flächenhaften Verteilung der Regenmenge (1961–1990), zur Änderung der Überschreitungstage (kumulativ) und zur Änderung der mittleren Ereignisintensität von Starkregenereignissen R80p, R90p, R95p und R99p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahr	106
Abbildung 27:	Box-Whisker-Plot zu den flächenhaften Verteilungen der Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R80p, R90p, R95p und R99p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden	107
Abbildung 28:	Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R80p, R90p, R95p, R99p für das Transekt West-Ost in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II; Lage der Transekte	108
Abbildung 29:	Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R80p, R90p, R95p, R99p für das Transekt Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II; Lage der Transekte	109
Abbildung 30:	Beispielhafte Darstellung kumulativer Anomalien des Monatsniederschlags an der Station Lauenstein (Erzgebirge) für den Zeitraum 1951–2003 – Vergleich zweier Anfangszeitpunkte der Berechnungen (1951 und 1952)	142
Abbildung 31:	Raum-zeitliches Muster des Auftretens von Dezil-Dürren (orange) und Dezil-Nassperioden (blau) an 130 Stationen innerhalb von neun Teilregionen Sachsens für den Zeitraum 1900–2010 (Fehlzeiten sind grau gekennzeichnet; aus HÄNSEL 2014).....	145
Abbildung 32:	Illustration des Zusammenhangs zwischen akkumuliertem Feuchteindex (linke Ordinate) und Größe des BMDI (rechte Ordinate) für verschiedene Akkumulationszeiträume (Abszisse) (aus OLAPIDO 1985).....	146
Abbildung 33:	Prinzipieller Aufbau des Wasserbilanzmodells mit zwei Speichern (aus CLOPPET 2011)	158
Abbildung 34:	Charakterisierung des täglichen Wassergehaltes an der Station Bordeaux im Jahr 2005 (blaue Linie; Referenz trockenjahr 1976 als schwarze Linie abgebildet) (aus CLOPPET 2011)	158

Abbildung 35:	Karte des Ariditätsanomalienindex in Indien für den 08.–14.10.2014 (links) und Ausblick über die für die Woche vom 15.–21.10.2014 (rechts) erwarteten Dürreintensitäten (http://www.imdpune.gov.in/research/drought/drought.html#map)	162
Abbildung 36:	Darstellung der Terminologie des dimensionslosen Performanceindizes (BASTIAANSEN et al. 2001)	164
Abbildung 37:	US-Dürremonitor für die gesamten Vereinigten Staaten für den 07.10.2014 (<i>The U.S. Drought Monitor is jointly produced by the National Drought Mitigation Center at the University of Nebraska-Lincoln, the United States Department of Agriculture, and the National Oceanic and Atmospheric Administration. Map courtesy of NDMC-UNL.</i>).....	172
Abbildung 38:	Nordamerikanischer Dürremonitor für den 30. September 2014 (http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/nadm-maps.php)	174
Abbildung 39:	Karte des Vegetation Drought Response Index am 06.10.2014 für die USA (http://vegdiri.unl.edu/)	175
Abbildung 40:	Kombinierter Dürreindex für Europa für den dritten 10-Tageszeitraum des Septembers 2014 (http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1120)	176
Abbildung 41:	Jahreszeitenmittel der Palmer (PDI), Bhalme & Mooley (BMDI) und Rooy (RAI) Dürreindizes für den Distrikt Panhandle in Nebraska, USA (OLAPIDO 1985)	179
Abbildung 42:	Vergleich des meteorologischen Dürre-Index RAI mit dem SPI (1-Monat) und dem PDSI für Willamette Valley, USA; die Korrelationskoeffizienten sind in der rechten unteren Ecke angegeben (aus KEYANTASH & DRACUP 2002).....	180
Abbildung 43:	Vergleich der landwirtschaftlichen Dürreindizes Bodenfeuchte (soil moisture) und Z-Index für Willamette Valley, USA (aus KEYANTASH & DRACUP 2002)	181
Abbildung 44:	Vergleich der hydrologischen Dürreindizes SWSI und PHDI für Willamette Valley, USA (aus KEYANTASH & DRACUP 2002).....	181
Abbildung 45:	Scatterplot für den SPI gegenüber den Indikatoren CZI, MCZI, Z-Score und EDI für die Station Deh Someh von 1970 bis 2001	183
Abbildung 46:	Boxplots (durchgezogene/gestrichelte Linie in der Box: Median/Mittelwert) der Korrelationen (Pearson-Koeffizient) zwischen den kontinuierlichen (monatlichen im Falle von Bodenfeuchte) Serien der Impactvariablen und den sechs betrachteten Dürreindizes (VICENTE-SERRANO et al. 2012a).....	186
Abbildung 47:	Vergleich des Dürrezustandes in Deutschland mittels des kombinierten Dürreindex auf der Webseite des EDO (http://edo.jrc.ec.europa.eu).....	190
Abbildung 48:	Dürresituation in Südosteuropa vom 8. bis 17. September 2014 (http://www.dmcsee.org/en/news/100/drought_situation_in_region_on_17th_september_2014.html)	191
Abbildung 49:	Hydrologische Trockenheit in der Schweiz; keine Hinweise auf Trockenheit am 23.10.2013 (http://www.drought.ch)	192

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einteilung der SPI-Werte in Feuchtezustandskategorien (nach McKEE et al. 1993, GUTTMAN 1999).....	27
Tabelle 2:	Übersicht über meteorologische Dürreindizes	28
Tabelle 3:	Hinweise zur Interpretation des SPI auf unterschiedlichen Zeitskalen.....	34
Tabelle 4:	Übersicht über landwirtschaftliche Dürreindizes	41
Tabelle 5:	Klassifikation der Bodenfeuchte (BÖTTCHER 2014a).....	47
Tabelle 6:	Dürresensitive Zeitabschnitte ausgewählter Nutzpflanzen (BÖTTCHER 2014a)	47
Tabelle 7:	Übersicht über ausgewählte hydrologische Dürreindizes	51
Tabelle 8:	Übersicht über eine Auswahl an auf Fernerkundungsdaten basierenden Dürreindizes.....	55
Tabelle 9:	Übersicht über kombinierte Dürreindizes	58
Tabelle 10:	Übersicht der untersuchten Klimastationen	62
Tabelle 11:	Fehlwerte pro Monat an den untersuchten Klimastationen	65
Tabelle 12:	Mittelwerte der Feldkapazität, des Welkepunktes und des maximalen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrates verschiedener Kreise der ehemaligen Bezirke Halle, Chemnitz und Dresden für die Schicht 0–200 cm (MÜLLER et al. 1995).....	66
Tabelle 13:	Niederschlagsindizes für Starkregen R80p, R90p, R95p und R99p	68
Tabelle 14:	Charakterisierung der Abweichungen zwischen SPI und SPEI in den einzelnen Monaten an der Station Dresden-Klotzsche (1961-2013)	76
Tabelle 15:	Ungewöhnlich große Differenzen zwischen SPI-1 und SPEI-1 (< -0,9 und > +0,7) und zeitgleiche Werte der mittleren Tagestemperatur (T _m), der Monatsniederschlagssummen (P), der Sonnenscheindauer (SD) und der potenziellen Verdunstung (ETP) einschließlich der klimatologischen Mittelwerte für 1961–2000 (gekennzeichnet durch Überstrich).....	77
Tabelle 16:	Anzahl der Überschreitungstage für Starkregen R80p, R90p, R95p und R99p für 30 Jahre kumulativ (d) und pro Jahr (d).....	88
Tabelle 17:	Anzahl der Überschreitungstage (d) (Minimum, Maximum und Durchschnitt) für Starkregen R99p der Pseudostationen Sachsens, Jahreszeiten und Vegetationsperioden.....	90
Tabelle 18:	Anzahl der Überschreitungstage (d) (Minimum, Maximum und Durchschnitt) für Starkregen R95p der Pseudostationen Sachsens, Jahreszeiten und Vegetationsperioden.....	90
Tabelle 19:	Prozentuale Änderung der Auftrittshäufigkeit (%) von Starkregenereignissen R80, R90p, R95p und R99p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden	93
Tabelle 20:	Klassifizierung der EDI-Werte.....	139
Tabelle 21:	Klassifizierung von Trockenheitszuständen unter Nutzung des Prozent-vom-Normalen Ansatzes für Monats- und Jahreswerte	140
Tabelle 22:	Klassifizierung der Monats-RAI-Werte auf Stationsbasis.....	143
Tabelle 23:	Klasseneinteilung der Dezile mit Beschreibung der Niederschlagsverhältnisse	144
Tabelle 24:	Kategorisierung des Feuchtezustandes nach Größe der BMDI-Werte	146
Tabelle 25:	Wasserverfügbarkeit für die Vegetation in Abhängigkeit vom HTC-Wert (MEHLER et al. 2014)	150
Tabelle 26:	Verhältnis von P zu ETP zur Bestimmung des Dürreindex DI (nach CIIAGRO/IAC/Brasilien in SIVAKUMAR et al. 2011)	152
Tabelle 27:	Akkumulierter Dürreindex (ADI) und Dürreklassifikation (CIIAGRO/IAC/Brasilien in SIVAKUMAR et al. 2011).....	152
Tabelle 28:	Klassifikation des Palmer-Index.....	155
Tabelle 29:	Bewertung des Perzentilrangs des YMI (http://www.pagasa.dost.gov.ph/climate-agromet/climate-impact-assessment/impact-assessment-for-agriculture).....	161
Tabelle 30:	Getreidekoeffizienten für ausgewählte Getreidearten nach DOORENBOS & PRUITT (1977)	161
Tabelle 31:	Klassifizierung des AAI (SARKAR 2011).....	163
Tabelle 32:	Kategorien des Agro-Hydro Potential (AHP).....	164
Tabelle 33:	Klassifikation des RDI (HAYES 2000).....	169
Tabelle 34:	Definition der Zustände hydrologischer Dürre mittels des SDI (NALBANTIS 2008).....	170

Tabelle 35:	Klassifikation des <i>Drought Monitor</i> (Verändert nach http://droughtmonitor.unl.edu/AboutUs/ClassificationScheme.aspx) 173
Tabelle 36:	Stufeneinteilung des kombinierten Dürreindex des EDO (http://edo.jrc.ec.europa.eu) 177

Abkürzungsverzeichnis

AHfk	Auftrittshäufigkeit
AAI	<i>Aridity Anomaly Index</i> – Ariditätsanomalien-Index
ADI	<i>Accumulated drought index</i> – Akkumulierter Dürreindex
AET	Aktuelle Evapotranspiration
API	<i>Antecedent Precipitation Index</i> – Vorläufer-Niederschlagsindex
AVHRR	NOAA <i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
AWC	<i>available water content</i> – verfügbarer Wassergehalt des Bodens
AWD	akkumuliertes Wasserdefizit
BF	Bodenfeuchte
BI	Blumenstock's Index
BMDI	<i>Bhalme-Mooley Drought Index</i> – Bhalme-Mooley-Dürreindex
CCI	WMO-Kommission für Klimatologie
CDD	<i>consecutive dry days</i> – Aufeinanderfolgende Trockentage (Maximum pro Jahr/Saison)
CDI	<i>Combined drought index</i> – Kombiniertes Dürreindex
CDI	<i>Corn drought index</i> – Dürreindex für Mais
CLIVAR	<i>Variability and predictability of the ocean-atmosphere system</i> (Projekt)
CPD	<i>Cumulative Precipitation Deficit</i> – Kumulative Niederschlagsanomalien
CSDI	<i>Crop specific drought index</i> – Pflanzenspezifischer Dürre Index
CWD	<i>climatic water deficit</i> – klimatologisches Wasserdefizit
CWSI	<i>Crop Water Stress Index</i> – Pflanzen-Wasserstress Index
Cy	Ulanova's index
DFI	Drought Frequency Index – Dürrehäufigkeitsindex
DI	Dezil-Index
DM	<i>Drought Magnitude</i> – Dürrestärke
dMI	Trockenheitsindex nach de Martonne
DSI	<i>Drought Severity Index</i> – Dürreschwereindex
DTx	<i>Regional agricultural drought index</i> – Regionaler Landwirtschaft Dürre Index
e	Sättigungsdefizit der Luft
ECDI	<i>EDO's combined drought index</i> – Kombiniertes Dürreindex des EDO
EDI	<i>Effective Drought Index</i> – Effektiver Dürreindex
EP	<i>effective precipitation</i> – effektiver Niederschlag
ESA	<i>European Space Agency</i> – europäische Raumfahrtagentur
ETCCDMI	CCI/CLIVAR <i>Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices</i>
ETDI	<i>Evapotranspiration deficit index</i> – Evapotranspirationsdefizit-Index
ETP	Potentielle Evapotranspiration
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FAO	<i>United Nations Food and Agricultural Organisation</i>
Fk	Feldkapazität
GPCC-DI	Global anwendbarer Dürreindex des GPCC'
GRI	<i>Groundwater Resource Index</i> – Grundwasserressourcen-Index
GW	Grundwasser
HDI	<i>Hybrid Drought Index</i> – Hybrider Dürreindex
HDSI	<i>Hutchinson Drought [Severity] Index</i> – Hutchinson-Dürreschwereindex
HPR	<i>heat/precipitation ratio</i> – Hitze-Niederschlags-Verhältnis

HTC	Hydro-thermaler Selyaninov-Koeffizient
IR	Infrarotes Licht
KBDI	Keetch-Byram Dürreindex
kc	pflanzenspezifische Koeffizienten
KFZ	Klimafeuchtezahl nach Müller
LST	<i>land surface temperature estimates</i> – Landoberflächentemperaturschätzer
MAI	<i>Moisture Adequacy Index</i> – Index zur Berechnung der angemessenen Feuchtigkeit für Pflanzen
MCDI	<i>Mediterranean crop drought index</i>
MetTP	Meteorologische Trockenperioden
MI	Munger-Index
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MPDI	<i>Modified Perpendicular Drought Index</i>
mPDSI	Modifizierter PDSI
MVCI	<i>Monthly VCI</i>
NA-DM	<i>North-American Drought Monitor</i> – Nordamerikanischer Dürremonitor
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDII	<i>Normalized Difference Infrared Index</i>
NDMC	<i>National Drought Mitigation Center</i>
NDTI	<i>Normalised difference temperature index</i>
NDVI	<i>Normalised Difference Vegetation Index</i>
NDVIA	<i>Normalised Difference Vegetation Index Anomaly</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
nFk	Nutzbare Feldkapazität
NIR	Nahes infrarotes Licht
NMDI	<i>Normalized Multi-Band Drought Index</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
P	<i>Precipitation</i> – Niederschlag
PAI	<i>Pálfai Aridity Index</i>
PDI	<i>Perpendicular Drought Index</i>
PDSI	<i>Palmer Drought Severity Index</i> – Palmer's Dürreschwereindex
PED	<i>Potential Evaporation Deficit</i> – Potentielles Verdunstungsdefizit
PGI	<i>Plant Growth Index</i> – Pflanzenwachstumsindex
PHDI	<i>Palmer Hydrological Drought Index</i> – Palmer's hydrologischer Dürreindex
Pk	korrigierter Niederschlag
PN	Prozent-vom-Normalen
Q	Abfluss
R80p	Niederschlagsereignisse mit einer Niederschlagshöhe > 80. Perzentil
R90p	Niederschlagsereignisse mit einer Niederschlagshöhe > 90. Perzentil
R95p	Niederschlagsereignisse mit einer Niederschlagshöhe > 95. Perzentil
R99p	Niederschlagsereignisse mit einer Niederschlagshöhe > 99. Perzentil
RAI	<i>Rainfall Anomaly Index</i> – Niederschlagsanomalienindex
RDI	<i>Reclamation drought index</i> – Wiedergewinnungsdürreindex
RDI	<i>Reconnaissance Drought Index</i> – Reconnaissance-Dürreindex
RDRI	<i>Remote Sensing Drought Risk Index</i>
ReS	Reservoirspeicher
RI	<i>National-Rainfall Index</i> – Nationaler Niederschlagsindex
RSDI	<i>Regional Streamflow Deficiency Index</i> – Regionaler Abflussdefizitindex

RSM	<i>Relative Soil Moisture</i> – Relative-Bodenfeuchte
RWDI	relative Wasserdefizit-Index
SAI	Standardisierter Anomalien-Index'
SC	Schneedecke(nspeicherung)
scPDSI	Selbstkalibrierender PDSI (scPDSI)
SD	Sonnenscheindauer
SDI	<i>Sperling Drought Index</i>
SDI	<i>Streamflow Drought Index</i> – Abflussdürreindex
SDI	<i>Standardized deficit index</i> – Standardisierter Defizit Index
SMAI	<i>Soil Moisture Anomaly Index</i> – Bodenfeuchteanomalien-Index
SMDI	<i>Soil moisture drought index</i> – Bodenfeuchte Dürre Index
SMDI	<i>Soil Moisture Deficit Index</i> – Bodenfeuchtedefizit-Index
SMI	<i>Soil moisture index</i> – Bodenfeuchtigkeitsindex
SPEI	<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i> – Standardisierter Niederschlags- Evapotranspirationsindex
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i> – Standardisierter Niederschlagsindex
SRC	<i>Soil retention capacity</i> – Bodenwasserspeicherefähigkeit
SSI	Standardisierter Abflussanomalienindex (SSI)
SWIR	<i>shortwave infrared</i> – Kurzwelliges Infrarot
SWSI	Oberflächenwasserversorgungsindex (SWSI)
T	Temperatur
TCI	<i>Temperature Condition Index</i>
TM	<i>Landsat Thematic Mapper</i>
Tm	mittlere Tagestemperatur
Tn	Minimaltemperatur
TVDI	<i>Temperature Vegetation Dryness Index</i>
Tx	Maximaltemperatur
US-DM	US Dürremonitor
VCDAI	<i>Vegetation Condition Albedo Drought Index</i>
VCI	<i>Vegetation Condition Index</i> – Vegetationszustandsindex
VegOut	<i>Vegetation Outlook</i> – Vegetationsausblick
VegRDI	<i>Vegetation Drought Response Index</i> – Index der Vegetationsreaktion auf Dürre
VHI	<i>Vegetation Health Index (VHI)</i>
VTCI	<i>Vegetation Temperature Condition Index</i>
WASP	„Weighted Anomaly Standardized Precipitation“ index
WBI	Wasserbilanzindex
WCRP	<i>World Climate Research Programme</i>
WSDI	<i>Warm Spell Duration Index</i> – Warmphasendauer-Index
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> – Weltorganisation für Meteorologie
WR	<i>Water requirement</i> – Wasserbedarf
YMI	<i>Yield Moisture Index</i> – Ertrags-Feuchteindex

1 Einleitung

Zahlreiche Untersuchungen für den Freistaat Sachsen (z. B. BERNHOFER et al. 2015) belegen, dass Sachsen von einer zunehmenden Trockenheit, insbesondere während der vegetationsaktiven Phase, betroffen ist. Die Witterungscharakteristik ist dabei nicht einheitlich. So sind in der Vegetationsperiode I (April bis Juni) die abnehmenden Niederschlagssummen für ein erhöhtes Trockenheitsrisiko maßgebend. In der Vegetationsperiode II (Juli bis September) wurden zwar zunehmende Niederschlagssummen festgestellt, jedoch hat der Starkregenanteil deutlich zugenommen. Somit werden längere trockenere Abschnitte von zunehmenden Starkregenereignissen unterbrochen. Dies hat ein erhöhtes Erosionsrisiko zur Folge. Beide Ausprägungen von Trockenheit besitzen eine hohe Impact-Relevanz.

Ziel dieser Studie ist eine Zeitskalen-übergreifende Identifizierung und Charakterisierung von trockenen Witterungsabschnitten für ausgewählte Stationen in Sachsen und der näheren Umgebung. Zum Zweck der Beschreibung von Trockenheit bzw. Dürre wurden in den letzten gut 100 Jahren eine Vielzahl von Dürreindizes entwickelt, die 1. unterschiedliche Eingangsdaten nutzen (z. B. meteorologische, hydrologische oder Fernerkundungsdaten), 2. verschiedene zeitliche und räumliche Skalen abdecken (z. B. Tage, Wochen, Monate, Jahre) und 3. unterschiedliche Impactrelevanz besitzen (Landwirtschaft, Ökologie, Hydrologie).

Um für die Untersuchungen in Sachsen in Abhängigkeit von den Datenverfügbarkeiten und dem Berechnungsaufwand geeignete Indizes für verschiedene Anwendungen zu identifizieren, wurde die aktuelle Literatur gesichtet. Dabei wurden insbesondere Indizes mit hoher Impactrelevanz berücksichtigt. Nach einer allgemeinen Beschreibung des Phänomens Trockenheit/Dürre mit seinen verschiedenen disziplinären Definitionsansätzen in Kapitel 2, widmet sich Kapitel 3 der Zusammenstellung der im Rahmen der Literaturrecherche identifizierten Dürreindizes. Die Indizes werden in die Kategorien „Meteorologische Dürreindizes“, „Landwirtschaftliche Dürreindizes“, „Hydrologische Dürreindizes“, „Dürreindizes basierend auf Fernerkundungsdaten“ und „Kombinierte Dürreindizes“ eingeordnet und hinsichtlich Berechnungsmethodik, Datenanforderungen, zeitlicher Skala sowie potenzieller Impactrelevanz beschrieben. Anschließend werden die wesentlichen Ergebnisse ausgewählter Vergleichsstudien von verschiedenen Dürreindizes dargestellt und einige Online-Dürreinformationsangebote vorgestellt. Basierend auf einer kleinen Auswahl an Dürreindizes wird Dürre im Freistaat Sachsen für den Zeitraum 1961–2013 anhand ausgewählter Klimastationen charakterisiert, grafisch dargestellt und interpretiert. Dabei wird auf unterschiedliche zeitliche Skalen und die Abhängigkeit der Ergebnisse von den verwendeten Eingangsdaten („nur“ Niederschlag oder auch Temperaturen und weitere Parameter) eingegangen. Am Ende werden die Ergebnisse von Literaturrecherche und Dürreindexberechnungen bewertet und Empfehlungen zu den weiteren Schritten eines Dürremonitorings in Sachsen gegeben.

Ein zweiter Schwerpunkt der Studie ist die flächenhafte Analyse des lokalen Starkregenverhaltens in Sachsen. In einem Fachgespräch „Wetterextreme“, an dem im Jahr 2011 zahlreiche Vertreter deutscher Behörden und wissenschaftlicher Einrichtungen teilnahmen, wurde auf die besondere Exponiertheit Sachsens gegenüber witterungsbedingten Extremen hingewiesen. Es wurde die Forderung nach impactrelevanten Definitionen von Extremen und praxisrelevanter, nutzerspezifischer Kennwerte untermauert. Aus dem möglichen Methodenspektrum zur Analyse von Witterungsextremen wurde u. a. die Analyse der Perzentile hervorgehoben.

In BERNHOFER et al. (2015) wurden auf der Grundlage täglicher Zeitreihen des korrigierten Niederschlags für ca. 20.000 Pseudostationen (1 km-Raster) mittels einer Kernschätzung die Auftretshäufigkeiten für lokale Starkniederschläge (95. Perzentil) zeitlich und räumlich analysiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden das 80., 90. und 99. Perzentil flächenhaft für Sachsen analysiert und mit den in BERNHOFER et al. (2015) erzielten

Ergebnissen für das 95. Perzentil verglichen. Im Ergebnis entstehen flächenhafte Verteilungen für Regenhöhen der jeweiligen Perzentile der Periode 1961–1990, für die Anzahl der Überschreitungstage (an denen die Perzentil basierte Schwelle überschritten wird) sowie für die Ereignisintensität der Perioden 1961–1990 und 1981–2010. Weiterhin werden die Auftrittshäufigkeiten als Funktion der Zeit für 1961–2010 berechnet und exemplarisch für zwei Transekte dargestellt. Ergänzt wird dies durch die Berechnung von Änderungen der Auftrittshäufigkeiten für 1981–2010 gegenüber 1961–1990. Als Bezugszeiträume werden – wenn es sich als fachlich sinnvoll erweist – das Jahr, die vier Jahreszeiten, die meteorologischen Halbjahre und die Vegetationsperioden I und II verwendet.

2 Trockenheits- bzw. Dürredefinition

2.1 Allgemeine Definitionsansätze

Die Definition von Dürre ist schon immer ein Stolperstein für das Dürremonitoring und Dürreanalysen gewesen. Eine universale Definition des Begriffes Dürre bzw. Trockenheit existiert aufgrund ihrer starken Abhängigkeit von Zeit und Raum nicht (z. B. HEINRICH & GOBIET 2011). Eine solche universale Definition wäre auch aufgrund der vielfältigen Auswirkungen von Dürre praktisch nicht umsetzbar. Trotz der Vielzahl unterschiedlicher Definitionen stimmen alle darin überein, dass eine Dürre ein Zustand unzureichender Feuchtebedingungen ist, der durch ein Niederschlagsdefizit über eine bestimmte Zeitdauer verursacht wird (z. B. BYUN & WILHITE 1999, DRACUP et al. 1980). Im Allgemeinen werden Dürren daher relativ zu einem mittleren Langzeitzustand des Niederschlags bzw. der klimatischen Wasserbilanz definiert; damit grenzen sie Zeiten ab, in denen die Wasserverfügbarkeit bezogen auf die langjährige Verteilung sehr gering ist (METTE et al. 2011). Aus statistischer Sicht ist Dürre ein seltenes Extremereignis und tritt mit einer bestimmten Wiederkehrwahrscheinlichkeit in nahezu allen Klimazonen auf (z. B. BENDER & SCHALLER 2014). Dies unterscheidet Dürren von der Aridität, wo eine geringe Wasserverfügbarkeit aufgrund der die Niederschlagsmenge übersteigenden Verdunstungsraten normal ist.

Im Unterschied zu vielen anderen Naturgefahren ist es für Dürren schwierig, den genauen Eintritts- und Endzeitpunkt zu bestimmen (MAYBANK et al. 1995). Als Naturkatastrophen sind Dürren nach der allgemeinen Definition jedoch nur bedingt anzusehen, weil sie zwar mit dem Fehlen von Niederschlägen beginnen, aber nicht plötzlich und unerwartet hereinbrechen (BENDER & SCHALLER 2014). Dass die Folgen von Dürren oft ein katastrophales Ausmaß annehmen, hat seine Ursachen überwiegend in organisatorischen, administrativen und politischen Problemen (PLAPP 2003). So können die in einer Region beobachteten Dürrebedingungen auch widerspiegeln, wie gut die Wasserressourcen in dieser Region gemanagt werden (OLAPIDO 1985). Dennoch werden in den meisten Studien Dürren als Naturkatastrophe bezeichnet und nach BRYANT (1991), welcher Naturgefahren basierend auf verschiedenen Eigenschaften wie Schwere, Dauer, räumlicher Ausdauer, Verlust und Menschenleben, ökonomische Verluste, soziale Auswirkungen und Langzeitauswirkungen bewertete, stehen Dürren auf Platz 1 der Naturgefahrenliste.

Hinsichtlich der Definition von Dürre unterscheidet man generell zwischen konzeptionellen und operationalen Dürredefinitionen (WILHITE & GLANTZ 1985). Konzeptionelle Dürredefinitionen helfen, die hinter dem Begriff Dürre stehenden Konzepte zu verstehen (SMAKHTIN & HUGHES 2004). So ist eine Dürre zum Beispiel eine langgezogene Periode von unzureichendem Niederschlag, die eine beträchtliche Schädigung von Getreide und somit Ernteeinbußen nach sich zieht. Solche konzeptionellen Dürredefinitionen sind normalerweise vage und liefern keine quantitativen Aussagen über Zeitpunkt, Länge oder Intensität einer Dürre. Sie können jedoch

beispielsweise bei der Etablierung der Dürrepolitik wichtig sein. Operationale Dürredefinitionen dagegen helfen, den Ausbruch, die Stärke, die zeitliche Ausdehnung und das Ende von Dürren zu definieren. Um den Beginn einer Dürre zu bestimmen, spezifizieren operationale Definitionen den Grad der Abweichung vom mittleren Niederschlag oder einer anderen Klimavariablen über eine bestimmte Zeiteinheit. Dies geschieht normalerweise durch den Vergleich der gegenwärtigen Situation mit dem historischen Mittelwert. Der Grenzwert, welcher für den Beginn einer Dürre (z. B. 75 % des mittleren Niederschlags während eines festgelegten Zeitabschnitts) identifiziert wird, ist gewöhnlich willkürlich festgelegt, statt auf genauen Beziehungen zu spezifischen Auswirkungen zu basieren.

Nachfolgend sind einige Beispiele für konzeptionelle Dürredefinitionen aufgelistet:

- (Landwirtschaftliche) Dürre ist ein Zustand, bei dem die von der Vegetation für die Atmung sowie die für die direkte Verdunstung von den Böden benötigte Wassermenge die im Bodenspeicher verfügbare Menge übersteigt (THORNTHWAITE 1947).
- Dürre ist eine anhaltende Periode ohne bedeutsame Niederschläge (LINSELEY et al. 1959).
- Dürre ist ein Zeitintervall – i. A. in der Größenordnung der Andauer von Monaten oder Jahren – während dem das aktuelle Feuchtigkeitsangebot an einem gegebenen Ort nahezu beständig die klimatisch erwarteten oder klimatisch angemessenen Feuchtelieferungen unterschreitet (PALMER 1965).
- Dürre ist der kleinste Wert des Tagesabflusses im Jahr (GUMBEL 1963).
- Dürre ist ein Zustand, der immer dann vorliegt, wenn die Wassermenge, welche erwartet wurde und auf die man sich bei jeder menschlichen Aktivität verlassen hat, aus irgendeinem Grund nicht erreicht wird (TAKEUCHI 1974).
- Dürre ist ein Mangel an Regen, der so groß und so lang anhaltend ist, dass er pflanzliches und tierisches Leben an einem Ort schädlich beeinträchtigt und die Wasservorräte sowohl für häusliche Zwecke als auch für den Betrieb von Kraftwerken entleert, insbesondere in Gegenden, wo der Niederschlag normalerweise für solche Zwecke ausreichend ist (US Wetterbüro; DRACUP et al. 1980)
- Dürre ist eine Periode unnormal trockenen Wetters, die ausreichend lange anhält, um ein schwerwiegendes hydrologisches Ungleichgewicht zu verursachen und mit einem Feuchtigkeitsdefizit bezüglich des menschlichen Wasserverbrauchs einhergeht (MCMAHON & ARENAS 1982).
- Das Hauptmerkmal einer Dürre ist der Rückgang der Wasserverfügbarkeit in einer bestimmten Periode und in einem bestimmten Gebiet (BERAN & RODIER 1985).
- Dürre bedeutet ein anhaltendes, ausgedehntes Niederschlagsdefizit (WMO 1986).
- Dürre ist eine ernsthafte Knappheit im Auftreten natürlicher Wässer bezogen auf das Normale (BEN-ZVI 1987).
- Dürre bezeichnet das natürliche Phänomen, das auftritt, wenn der Niederschlag signifikant unter dem normalerweise beobachteten Niveau liegt und schwerwiegende hydrologische Ungleichgewichte hervorruft, welche die landwirtschaftlichen Produktionssysteme negativ beeinflussen (*UN Convention to Combat Drought and Desertification*; UN Secretariat General 1994).

Eine operationale Definition für die Landwirtschaft könnte Tagesniederschlagswerte mit den Evapotranspirationsraten vergleichen, um das Ausmaß der Verminderung der Bodenfeuchtigkeit zu bestimmen und dann diese Beziehung als Trockenheitseffekt auf das Pflanzenverhalten (z. B. Wachstum, Ertrag) zu verschiedenen Stadien der Getreideentwicklung ausdrücken. Eine solche Definition könnte in einer operationellen Bewertung des Ausmaßes und der Auswirkungen der Dürre genutzt werden, indem meteorologische Variablen, Bodenfeuchtigkeit und Getreidebedingungen während der Wachstumsperiode verfolgt und der potenzielle Einfluss dieser Bedingungen auf den letztendlichen Ertrag kontinuierlich neu abgeschätzt werden. Im Abschnitt 3 werden operationale Definitionen für meteorologische Trockenperioden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Impact-Relevanz bewertet.

2.2 Funktionale bzw. disziplinäre Dürre-Typen

Liegt ein Niederschlagsmangel vor, so resultiert dieses Defizit bei entsprechend langem Fortbestehen in einer Wasserknappheit für irgendeine Aktivität, Gruppe oder einen Umweltsektor. Weil eine Dürre in jeder einzelnen Region unterschiedliche Facetten aufweisen kann, variieren Dürredefinitionen in Abhängigkeit von der typischen Niederschlagscharakteristik der Regionen und den Aufgabengebieten, für die sie definiert wurden. Schwierigkeiten bei der Definition von Dürren beziehen sich z. B. auf die Zeitdauer, über welche sich die Defizite akkumulieren sowie den Zusammenhang dieser Niederschlagsdefizite mit Defiziten in den nutzbaren Wasservorräten und den dadurch hervorgerufenen Auswirkungen. Zu den nutzbaren Wasservorräten gehören die Bodenfeuchtigkeit, das Grundwasser, die Schneedecke, der Abfluss und künstliche Wasserspeicher, wie z. B. Talsperren. Der Zeitabschnitt zwischen dem Auftreten des Niederschlagsereignisses und der Ankunft des Wassers in jedem dieser nutzbaren Speicher variiert sehr stark. Die Zeitdauer, über die sich Niederschlagsdefizite akkumulieren, ist sehr bedeutend und kann für eine funktionelle Untergliederung in verschiedene Dürretypen wie meteorologische, landwirtschaftliche, hydrologische und sozioökonomische Dürre genutzt werden. Zum Teil wird zusätzlich zur hydrologischen Dürre auch noch die Grundwasserdürre einbezogen.

2.2.1 Meteorologische Dürre

Eine meteorologische Dürre wird relativ zu einem langfristigen mittleren Zustand des Gleichgewichtes zwischen Niederschlag und Evapotranspiration in einem bestimmten Gebiet – einem Zustand der häufig als „normal“ wahrgenommen wird – bestimmt (Abbildung 1). Somit sind meteorologische Messungen die ersten Indikatoren für eine beginnende Dürre. Sie ist auch mit dem Timing (z. B. prinzipielle Jahreszeit des Auftretens, Verzögerungen des Beginns der Regensaison, Vorkommen des Regens in Beziehung zu den grundsätzlichen Wachstumsstadien des Getreides) und der Effektivität (z. B. Intensität und Zahl der Regenereignisse) des Niederschlags verbunden. Andere Klimafaktoren wie hohe Temperaturen, starke Winde sowie geringe relative Luftfeuchte und Wolkenbedeckung sind in vielen Regionen der Welt mit Dürren verbunden und können ihre Intensität und Auswirkungen verschlimmern.

Die Definition meteorologischer Dürren muss regionsspezifisch erfolgen, weil die in Niederschlagsdefiziten resultierenden atmosphärischen Bedingungen von Region zu Region extrem variabel sind. So identifizieren einige meteorologische Dürredefinitionen Dürreperioden auf der Basis der Zahl der Tage mit Niederschlag unterhalb einer spezifischen Schwelle. Dieses Maß ist nur angemessen für Regionen, die durch ein während des Jahres verhältnismäßig gleichmäßiges Niederschlagsregime gekennzeichnet sind, wie tropischer Regenwald, humide subtropische Klimate oder humide Klimate mittlerer Breiten, wie dem hier betrachteten Untersuchungsgebiet. Andere Definitionen können aktuelle Niederschlagsabweichungen zu den durchschnittlichen Mengen auf monatlichen, jahreszeitlichen oder jährlichen Zeitskalen in Beziehung setzen.

2.2.2 Land- und forstwirtschaftliche Dürre

Aufgrund seiner starken Abhängigkeit von gespeichertem Bodenwasser ist der landwirtschaftliche Sektor in der Regel der erste Wirtschaftszweig, der von den Auswirkungen einer Dürre betroffen ist (Abbildung 1). Das Bodenwasser kann sich während ausgedehnter Trockenperioden schnell erschöpfen und nach einiger Zeit ist auch die Forstwirtschaft betroffen. Immer tiefer liegende Bodenwasserspeicher werden entleert.

Von einer land- bzw. forstwirtschaftlichen Dürre spricht man, wenn der Bodenwassergehalt dem Bedarf einer bestimmten Nutzpflanze zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht entspricht. Dementsprechend beziehen sich forstwirtschaftliche Dürren auf ein Bodenwasserdefizit für bestimmte Baumarten. Land- und forstwirtschaftliche Dürren setzen verschiedene Charakteristika meteorologischer (oder hydrologischer) Dürren zu land- und

forstwirtschaftlichen Auswirkungen in Beziehung, wobei der Fokus auf Niederschlagsengpässen, Unterschieden zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration, Bodenwasserdefiziten, reduzierten Grundwasser- oder Reservoirspiegeln usw. liegt. Der Wasserbedarf einer Pflanze hängt von den vorhergegangenen Wetterbedingungen, den biologischen Charakteristika der spezifischen Pflanze, ihrem Wachstumsstadium und den physikalischen und biologischen Eigenschaften des Bodens ab. Eine gute Definition landwirtschaftlicher Dürre sollte in der Lage sein, die variablen Empfindlichkeiten der Nutzpflanzen von der Keimung bis zur Reife einzu beziehen. Mangelnde Oberbodenfeuchtigkeit in der Anpflanzung kann die Keimung behindern, was zu einer geringen Pflanzenpopulation pro Hektar und zu einer Reduktion des Ernteertrages führt. Wenn jedoch die Oberbodenfeuchtigkeit für das frühe Wachstum ausreichend ist, besteht die Möglichkeit, dass Defizite in der Unterbodenfeuchtigkeit zu diesem frühen Stadium den letztendlichen Ertrag nicht beeinflussen, wenn während der fortschreitenden Wachstumsperiode die Unterbodenfeuchtigkeit aufgefüllt wird, oder wenn der Regen den Bedürfnissen der Pflanzen entspricht.

2.2.3 Hydrologische Dürre

Bestehen die Niederschlagsdefizite noch weiter, werden die Abflüsse in Einzugsgebieten gemindert, bis sie letztlich nur noch durch das Grundwasser gespeist werden. Dementsprechend verringern sich die Pegelstände von Flüssen, Seen, Talsperren und Grundwasser sowie die Ausdehnung von Feuchtgebieten (Abbildung 1). Die Menschen, welche von diesen Wasserquellen abhängen, beginnen, die Effekte der Knappheit zu spüren. Jene, welche vom Oberflächenwasser (z. B. Talsperren und Seen) und von unterirdischem Wasser (z. B. Grundwasser; siehe Abschnitt 2.2.4) abhängen, sind gewöhnlich als letzte betroffen. Eine Kurzzeit-Dürre, die weniger als drei bis sechs Monate andauert, hat auf diese Sektoren wahrscheinlich nur geringe Auswirkungen, was von den Eigenschaften des hydrologischen Systems und den Anforderungen der Wassernutzer abhängt. Daher umfassen die meisten Studien zu hydrologischen Dürren Zeiträume von mehr als drei Monaten. Einige Studien widmen sich jedoch auch kurzfristigeren Abflussdefizite (< 3 Monate; ZELENHASIC & SALVAI 1987).

Spricht man von hydrologischen Dürren, so bezieht man sich auf Defizite in der oberflächlichen und unterirdischen Wasserversorgung, wobei zum Teil für die Defizite in der unterirdischen Wasserversorgung auch der Begriff Grundwasserdürre verwendet wird (siehe Abschnitt 2.2.4). Sie werden als Abfluss sowie als See- und Reservoirspiegel gemessen. Eine hydrologische Dürre liegt dann vor, wenn die Wasserreserven in Seen oder Wasserspeichern unter einen festgelegten Schwellenwert wie einen statistischen monatlichen Durchschnittswert oder einen definierten Wasserstand fallen. Dabei ist es (zumindest in den mittleren Breiten) auch entscheidend, in welcher Jahreszeit das Abflussdefizit auftritt. Grundsätzlich kann zwischen Sommer- und Winterdürre unterschieden werden (TALLAKSEN & HISDAL 1997), die auf verschiedene Ursachen zurückgehen. Im Sommer führen im Allgemeinen die geringeren Niederschlagsmengen zu niedrigeren Abflüssen, während im Winter die Niederschläge als Schnee und Eis zurückgehalten werden und dadurch nicht direkt zum Abflussgeschehen beitragen können.

Niederschlagsdefizite brauchen länger, um in Bestandteilen des hydrologischen Systems sichtbar zu werden. Erst wenn die Niederschläge über eine ausgedehnte Zeitdauer geringer werden oder defizitär sind, wird sich diese Knappheit in sinkenden ober- und unterirdischen Wasserständen niederschlagen. So kann z. B. ein Niederschlagsdefizit in einer schnellen Entleerung der Bodenwasserspeicher resultieren, was Landwirte fast sofort wahrnehmen können. Der Einfluss dieses Defizits auf die Wasserstände von Talsperren muss jedoch über Monate keine Beeinträchtigung der Wasserenergienutzung oder der Nutzung zu Erholungszwecken nach sich ziehen. Deshalb treten diese Auswirkungen auch nicht zeitgleich mit den Auswirkungen in anderen ökonomischen Sektoren auf. Häufig treten hydrologische Dürren nicht gleichzeitig mit meteorologischen oder landwirtschaftlichen Dürren auf, sondern sind von diesen mehr oder weniger entkoppelt. Die Häufigkeit und Schwere von hydrologischen Dürren wird häufig auf der Ebene von Einzugsgebieten definiert.

Auch wenn das Klima primär zu hydrologischen Dürren beiträgt, haben auch andere Faktoren, wie Veränderungen in der Landnutzung (z. B. Entwaldung), Landdegradierung und der Bau von Staudämmen Einfluss auf die hydrologischen Eigenschaften des Einzugsgebietes. Weil einige Regionen durch hydrologische Systeme untereinander verbunden sind, können sich die Auswirkungen einer meteorologischen Dürre über die Grenzen des Niederschlagsdefizitgebietes hinaus ausdehnen. Veränderungen in der Landnutzung stromaufwärts können die hydrologischen Eigenschaften wie Infiltrations- und Abflussraten verändern, was zu einem variablen Abfluss und zu einer höheren Häufigkeit hydrologischer Dürre flussabwärts führt. Landnutzungsänderungen sind ein Weg, auf dem Menschen die Häufigkeit von Wassermangel verändern, auch wenn sich die beobachtete Häufigkeit von meteorologischen Dürren nicht verändert.

Hydrologische Dürren werden zumeist beschrieben durch Angaben zu ihrem Beginn, dem Abfluss-Mittelwert in Verbindung mit dem Beginn und Ende der Dürre oder aber auch Datumsangaben mit den jeweiligen minimalen Durchflussmengen (BENDER & SCHALLER 2014). Häufig wird auch ein kombinierter Dürre-Index verwendet, welcher das Verhältnis von Dürre-Defizit-Volumen mit der Dürre-Dauer verknüpft.

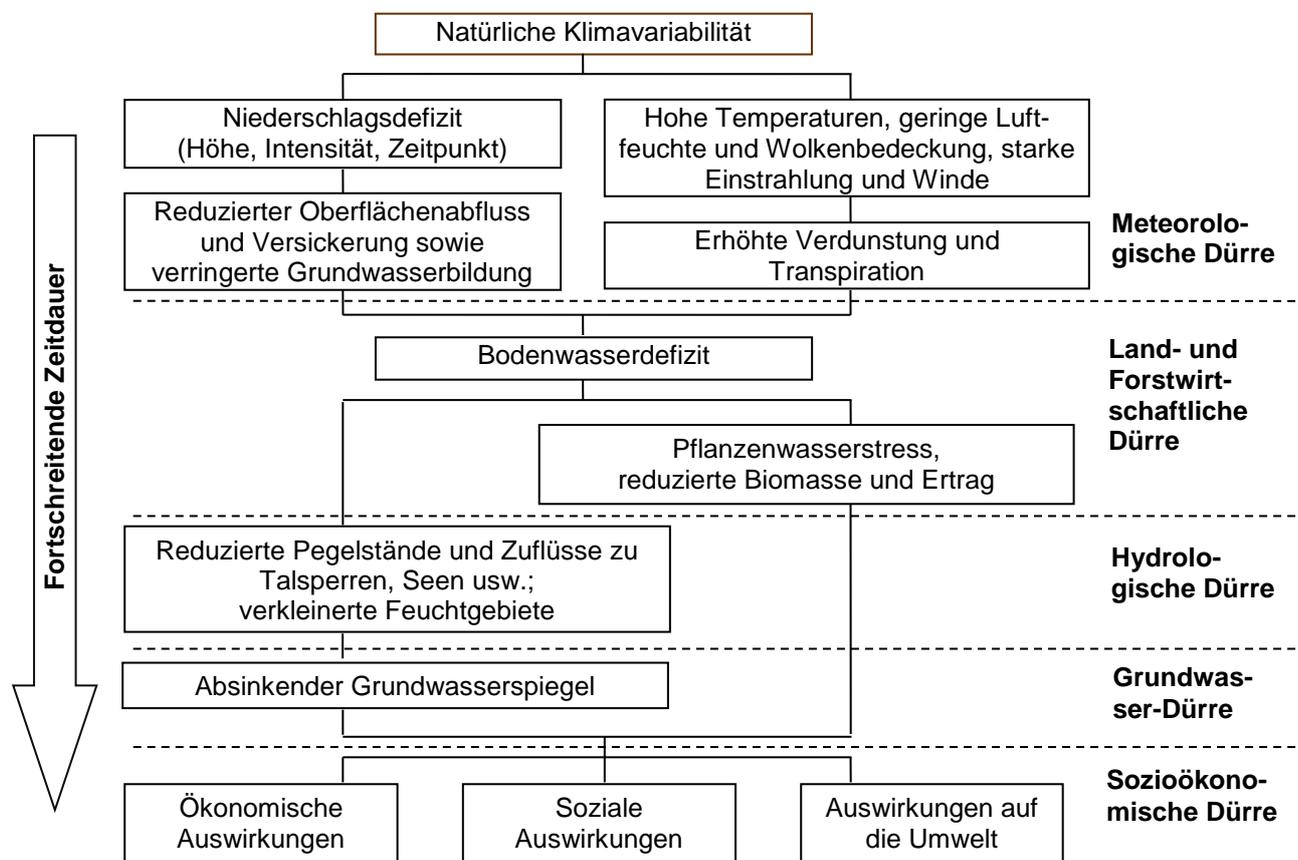


Abbildung 1: Zeitliche Abfolge eine Dürre¹

2.2.4 Grundwasser-Dürre

¹ Verändert nach National Drought Mitigation Center, University of Nebraska (<http://www.drought.unl.edu/whatis/concept.htm>)

Fortbestehende Niederschlagsdefizite führen zu einem weiteren Absinken des Grundwasserspiegels. Erreicht der Grundwasserstand einen kritischen Stand, so spricht man von Grundwasser-Dürre. Sie ist verbunden mit negativen umweltrelevanten oder sozio-ökonomischen Folgen wie das Versiegen von Quellen oder der verringerte Abfluss von grundwassergespeisten Bächen. Daher werden in einigen Ländern Grundwasserstände beobachtet, um aufkommende Grundwasser-Dürren frühzeitig zu erkennen. Der Begriff der Grundwasser-Dürre wird jedoch oft nicht explizit verwendet und zum Teil werden die Grundwasser-Dürren den hydrologischen Dürren zugeordnet.

Trotz seiner großen hydrologischen Bedeutung wird das Grundwasser bei vielen Dürre-Analysen ignoriert (BENDER & SCHALLER 2014). Demzufolge existieren in der Literatur nur wenige Definitionen. Zur Untersuchung von Grundwasser-Dürren werden die Grundwasserneubildung, Grundwasserstände und der Grundwasserzustrom herangezogen (TATE & GUSTARD 2000). Ebenso kann die Ausdehnung der gesättigten Zone oder der Fläche von Feuchtgebieten berücksichtigt werden (BENDER & SCHALLER 2014).

2.2.5 Sozioökonomische Dürre

Dürren sollten nicht als ein rein physisches Problem oder natürliches Ereignis betrachtet werden. Ihre Einflüsse auf die Gesellschaft (Abbildung 1) resultieren auch aus dem Zusammenspiel zwischen einem natürlichen Ereignis (weniger Niederschlag als resultierend aus der natürlichen Klimavariabilität erwartet) und den Ansprüchen, die Menschen an die Wasserversorgung haben. Beginnt die physische Wasserknappheit Menschen entweder individuell oder kollektiv zu beeinträchtigen, so spricht man von einer sozioökonomischen Dürre. Dies tritt z. B. ein, wenn der Wasserverbrauch der Bevölkerung die natürlich vorhandenen und regenerierbaren Wasservorräte übersteigt (CUTTER 2001). Auch Planungsfehler und Missmanagement können diesen Dürretyp auslösen oder verstärken (SÁNCHEZ et al. 2000 in BENDER & SCHALLER 2014).

Sozioökonomische Dürren setzen Angebot und Bedarf eines ökonomischen Gutes mit Elementen von meteorologischen, hydrologischen und landwirtschaftlichen Dürren in Beziehung. Sie weicht von den oben genannten Dürretypen ab, weil ihr Vorkommen von den zeitlichen und räumlichen Prozessen des Angebots und Bedarfs abhängt. Das Angebot vieler ökonomischer Güter wie Wasser, Viehfutter, Getreide, Fisch und Wasserkraft hängt vom Wetter ab. Aufgrund der natürlichen Variabilität des Klimas ist in manchen Jahren das Wasserangebot reichlich, in anderen jedoch nicht fähig, die Bedürfnisse von Mensch und Natur zu erfüllen. Eine sozioökonomische Dürre tritt auf, wenn der Bedarf eines ökonomischen Gutes das Angebot, aufgrund einer wetterbedingten Knappheit im Wasserangebot, übersteigt.

Resultierend aus der wachsenden Bevölkerungszahl und dem ansteigenden Pro-Kopf-Verbrauch steigt die Nachfrage nach ökonomischen Gütern in den meisten Regionen an. Aufgrund verbesserter Produktionseffizienz und neuer Technologien oder dem Bau von Speicherbecken, welche die Kapazität zur Oberflächenwasserspeicherung erhöhen, kann sich auch das Angebot erhöhen.

Wenn sowohl Angebot als auch Bedarf ansteigen, ist das relative Verhältnis der Veränderungen der kritische Faktor. Steigt der Bedarf schneller an als das Angebot, so könnten sich in der Zukunft die Empfindlichkeit gegenüber und die Häufigkeit von sozioökonomischen Dürren erhöhen. Die Menschen verschlimmern häufig den Einfluss von Dürren. Die kürzlich sowohl in Entwicklungsländern als auch in Industriestaaten aufgetretenen Dürren und deren resultierende ökonomische und ökologische Einflüsse und persönlichen Härten haben die Empfindlichkeit aller Gesellschaftsschichten gegenüber dieser Naturgefahr unterstrichen

Wenn der Niederschlag zu normalen Verhältnissen zurückkehrt und die meteorologischen Dürrebedingungen abgeklungen sind, wiederholt sich die Abfolge für die Erholung der ober- und unterirdischen Wasserspeicher.

Die Bodenwasserreserven werden zuerst wieder aufgefüllt, gefolgt von den Vorflutern, Talsperren und Seen sowie dem Grundwasser. Die Dürreauswirkungen können sich im landwirtschaftlichen Sektor, aufgrund seiner Abhängigkeit vom Bodenwasser, schnell vermindern, jedoch in anderen Sektoren, die von gespeichertem Oberflächenwasser oder unterirdischen Wasserquellen abhängen, für Monate oder sogar Jahre andauern. Grundwassernutzer, welche häufig als letztes vom Ausbruch einer Dürre betroffen sind, werden wahrscheinlich die letzten sein, die eine Rückkehr zu normalen Wasserständen erleben. Die Länge einer Erholungsperiode ist eine Funktion der Intensität der Dürre, ihrer Dauer und der Niederschlagsmenge am Ende dieser Episode.

2.3 Ebenen von Dürre

Dürren werden im Wesentlichen durch drei Dimensionen beschrieben: ihre Schwere (*severity*), ihre Dauer und ihre räumliche Ausdehnung. Zum Teil werden sie auch charakterisiert durch ihre Häufigkeit, ihr Ausmaß (*magnitude*; kumuliertes Defizit), die Vorhersagbarkeit und ihren Eintrittszeitpunkt (ZARGAR et al. 2011). Leider werden nicht immer die gleichen Begrifflichkeiten verwendet und so wird die Bedeutung von *severity* (Schwere), *intensity* (Intensität) und *magnitude* (Ausmaß) manchmal vertauscht. Zum Teil werden auch ganz andere Begriffe für die gleichen Charakteristika von Dürre verwendet. So nutzt YEVJEVICH (1967) für die Dürreaspekte die DRACUP et al. (1980) *severity*, *duration*, and *magnitude* nennen, die Begriffe *run-sum*, *run-length*, and *run-intensity*. SALAS (1993) schlug die folgende, weitverbreitet verwendete Terminologie vor:

Dauer (*duration*): Die zeitliche Andauer einer Dürre, gemessen in Tagen, Wochen, Monaten oder Jahren kann in einer Region in Abhängigkeit von der durch den Dürreindex adressierten Zeitskala sehr stark schwanken. Unter Betrachtung verschiedener Zeitskalen kann eine Region zeitgleich eine Dürre und eine Nassperiode erfahren. So mag die Region auf kurzen Zeitskalen eine Trockenheit oder Nassheit erfahren, während auf längeren Zeitskalen Wasserüberschüsse oder -defizite vorherrschen (NCDC 2010).

Ausmaß (*magnitude*): Das Ausmaß einer Dürre bezieht sich auf das während einer Dürreperiode akkumulierte Wasserdefizit. Dieses kann über den Niederschlag, die Bodenfeuchte oder den Abfluss quantifiziert werden, wobei die Werte unterhalb eines festgelegten Schwellenwertes akkumuliert werden.

Intensität (*intensity*): Die Dürreintensität bezeichnet das Verhältnis von Dürreausmaß zu seiner Andauer.

Schwere (*severity*): Der Begriff Dürreschwere wird für zwei Sachverhalte verwendet. Zum einen bezeichnet sie den Grad des Niederschlagsdefizites (im Sinne von Dürreausmaß) und zum anderen den Grad zu dem aus dem Niederschlagsdefizit Auswirkungen (*impacts*) resultieren (WILHITE 2004).

Geografische Ausdehnung (*geographic extent*): Dieser Begriff bezieht sich auf die von einer Dürre betroffene Fläche, die während des Dürreereignisses schwankt. Diese Fläche kann einen oder mehrere Pixel/Zellen betreffen, Wassereinzugsgebiete oder Regionen.

Häufigkeit oder **Wiederkehrintervall** (*frequency/return period*): Die Häufigkeit einer Dürreperiode ist definiert als die mittlere Zeit zwischen einzelnen Dürreereignissen, welche eine Schwere haben, die größer oder gleich einem bestimmten Schwellenwert ist.

2.4 Anmerkungen zu den Begrifflichkeiten

Schon begrifflich steckt in den Worten **Trockenheit**, **Trockenperiode** und **Dürre** großes Potenzial für Missverständnisse. Unter Trockenheit verstehen einige den konstanten Zustand geringen Niederschlags in bestimmten Regionen der Erde, wissenschaftlich auch als Aridität bezeichnet, während andere den Begriff im Sinne der Dürredefinition als negative Abweichung des Wasserdargebotes von einem Normalzustand verstehen. Problematisch ist beispielsweise auch in der (englischsprachigen) Literatur die Unterscheidung zwischen Dürren und Trockenperioden. Häufig werden beide Begriffe synonym verwendet, zum Teil wird Dürre auch als fortschreitende bzw. langandauernde Trockenheit definiert (z. B. BENDER & SCHALLER 2014). MARACCHI (2000) stellt beispielsweise fest, dass Agrarwissenschaftler das Wort Dürre zur Definition eines Wasserstresszustandes verwenden, der das Getreidewachstum und den -ertrag beeinträchtigt. Trockene Phasen kurzer Andauer werden für die Landwirtschaft nicht als Dürren, sondern als *dry spell* (Trockenheit) betrachtet (PEREIRA & PAULO 2004).

Im deutschen Sprachgebrauch wird der Dürrebegriff häufig eher auswirkungsbezogen (Auswirkungen der Dürre auf Gesellschaft, Ökonomie und Ökologie) verwendet, während Trockenperioden sich eher auf das bloße Auftreten eines im Vergleich zum Klimanormalen zu trockenen Zeitabschnittes beziehen. Dies entspricht der Definition von *meteorological drought* in der englischen Fachliteratur. Dieser Bericht bezieht sich im Wesentlichen auf diese meteorologischen Trockenperioden/Dürren und die entsprechenden Indikatoren zu ihrer Quantifizierung.

Zusätzlich zu dem Begriff Dürre wird teilweise auch der Begriff **Austrocknung** (*desiccation*) verwendet (z.B. AGNEW 2000, WARREN & KHOGALI 1992). Dabei bezeichnet Austrocknung einen über Dekaden andauernden Zeitraum der Aridisierung, hervorgerufen durch den Klimawandel. Mit einer Austrocknung geht daher eine erhöhte Häufigkeit von Dürren einher.

Auch die Begriffe **Index** und **Indikator** werden zum Teil unterschiedlich definiert. So ist ein Dürreindikator ein Maß für eine meteorologische, hydrologische, landwirtschaftliche oder sozioökonomische Variable, die den potenziellen mit einer Dürre verbundenen Stress oder Defizit anzeigt². Zu den Indikatoren zählen daher die Niederschlagssummen, Wasserstände in Flüssen, Bodenfeuchteinformationen, Wasserspeicherfüllung, Zustand des Getreides und Ernteertragsberichte, Temperatur, Gesundheit bzw. Stress der Vegetation, kurz- und langfristige saisonale Vorhersagen, Grundwasser und Schneedecke. Der Begriff Dürreindex bezeichnet dagegen die Methode zur Ableitung eines Mehrwertes, bezogen auf Dürre durch den auf statistischen Berechnungen basierenden Vergleich der gegenwärtigen Bedingungen mit historischen Informationen (z. B. HAYES 2000, ZARGAR et al. 2011). Anders ausgedrückt ist ein Dürreindex ein auf Klimainformationen basierender Proxy, von dem angenommen wird, dass er das Ausmaß der Dürregefährdung auf ein sensibles System adäquate quantifizieren kann (VICENTE-SERRANO et al. 2012a). Die WMO definiert einen Dürreindex als einen Index, der verbunden ist mit einigen der kumulativen Effekte eines langandauernden und unnormalen Feuchtigkeitsdefizites. Häufig werden die beiden Begriffe jedoch synonym verwendet.

² http://drought.unl.edu/Portals/0/docs/workshops/03222012_Kingston_Jamaica/Brian%20Fuchs--Drought%20Indices&Indicators.pdf

3 Dürreindizes

3.1 Einsatzzweck

Zur Charakterisierung von Dürre existieren verschiedene Methoden, die vorherrschende ist jedoch die Verwendung von Dürreindizes (TSAKIRIS et al. 2007). Dürreindizes sind quantitative Maße zur Charakterisierung eines Dürreniveaus, welche durch die Assimilation von Daten aus einer oder mehreren Variablen (Indikatoren) wie Niederschlag, Temperatur, Evapotranspiration und Abfluss in einen einzigen numerischen Wert gebildet werden (ZARGAR et al. 2011). Der Dürreindex kann in verschiedene Dürrekategorien wie „leichte, moderate, schwerwiegende und extreme Dürre“ eingeteilt werden, die zur Festlegung des Beginns und Endes von verschiedenen Dürrereaktionsmaßnahmen genutzt werden. Der Schwellenwert des Indikators, der für diese Kategorisierung genutzt wird, ist der Dürreauslöser (*drought trigger*).

Ein Dürreindex liefert somit ein umfassenderes Bild für die Dürreanalyse und die Entscheidungsfindung ist leichter nutzbar und aussagekräftiger als die rohen Indikatordaten (HAYES 2000). Dabei können die Indizes unterschiedliche Aspekte von Dürre wiedergegeben (siehe Abschnitt 2.3) und sich auf unterschiedliche sektorale Auswirkungen (siehe Abschnitt 2.2) beziehen. Dürreindizes wurden zum Hauptwerkzeug der Kommunikation des Dürreniveaus zwischen verschiedenen beteiligten Einheiten/Institutionen/Anwendern (ZARGAR et al. 2011).

Der Einsatz von Indizes dient verschiedenen Zwecken:

- der Detektion und der Echtzeit-Verfolgung von Dürren (NIEMEYER 2008)
- dem Festsetzen des Beginns oder Endes einer Dürreperiode (TSAKIRIS et al. 2007)
- dem Festsetzen von Dürrestufen (z. B. für Dürremanager) zur Einleitung von Handlungsmaßnahmen
- der Dürrebewertung (NIEMEYER 2008)
- dem Darstellen des Konzeptes von Dürre in einer Region (TSAKIRIS et al. 2007)
- dem Korrelieren mit quantitativen Dürreauswirkungen über verschiedene Skalen von Zeit und Raum
- der Förderung der Kommunikation von Dürrezuständen zwischen verschiedenen Sichtweisen bzw. Bewertungsmaßstäben

Bei der Erstellung bzw. Auswahl eines Dürre-Indexes werden in der Regel folgende fünf grundlegenden Kriterien (nach FRIEDMAN 1957 und HEIM 2002) verwendet:

- Die Zeitskala sollte für das vorliegende Problem angemessen sein.
- Der Index sollte ein quantitatives Maß von großräumigen und landandauernden Dürrebedingungen sein.
- Der Index sollte auf das untersuchte Problem anwendbar sein.
- Eine lange und genaue Aufzeichnung des Indexes sollte verfügbar oder berechenbar sein.
- Zumindest für den Einsatz im Rahmen eines operationalen Dürremonitorings sollte der Index in nahezu Echtzeit berechenbar sein.

Eine Vielzahl von Reviews stellen die verschiedenen, weltweit entwickelten und genutzten Dürreindizes vor. Dazu gehören die Übersichten von RAO & VOELLER (1997), WHITE et al. (1998), HAYES (2000), HEIM (2002), KEYANTASH & DRACUP (2002), KALLIS (2008), NIEMEYER (2008), QUIRING (2009), STEINEMANN (2003), STEINEMANN et al. (2005), STEINEMANN & CAVALCANTI (2006), WILHITE et al. (2006), TSAKIRIS et al. (2007), WHITE & WALCOTT (2009), MISHRA & SINGH (2010), ZARGAR et al. (2011).

3.2 Universelle Indizes?

Die Vielfalt der vorgeschlagenen Dürreindizes spiegeln die Vielfalt in der Wahrnehmung von Dürre wieder (ZARGAR et al. 2011). Dabei macht es die wechselseitige Abhängigkeit zwischen klimatischen, hydrologischen, geologischen, geomorphologischen, ökologischen und sozialen Variablen schwierig, eine Definition anzunehmen, die das Dürrephänomen mit all seinen jeweiligen Auswirkungen voll beschreibt (PEREIRA & PAULO 2004). Dennoch gibt es Ansätze, einheitliche Indizes zu verwenden, um die Vergleichbarkeit über verschiedene Regionen hinweg zu gewährleisten.

Mit dem Ziel, das Dürremonitoring und das Klimarisikomanagement effektiver zu gestalten, verabschiedeten 54 Dürreexperten aus aller Welt (22 Länder) die Lincoln-Deklaration zu Dürreindizes (HAYES et al. 2011). Auf dem Interregionalen Workshop zu *'Indices and Early Warning Systems for Drought'*, welcher vom 8. bis 11. Dezember 2009 in den Vereinigten Staaten an der Universität von Nebraska-Lincoln stattfand, einigten sich die Experten auf die Verwendung eines universalen meteorologischen Dürreindex – nämlich dem *Standardized Precipitation Index* SPI. Der SPI soll von allen nationalen meteorologischen und hydrologischen Diensten zur Charakterisierung meteorologischer Dürren angewendet werden. Das frühzeitige Erkennen einsetzender Dürren und die Bewertung ihrer Intensität durch die Verwendung des SPI soll Ernteversicherungs-Programme für die Bauern und ihren Lebensunterhalt nachhaltig verbessern. Die Experten entschieden des Weiteren, eine ähnlich umfassende Review zu landwirtschaftlicher und hydrologischer Dürre vorzunehmen, um auch hier gemeinsame Indizes für verbesserte Frühwarnungen im Landwirtschafts- und Wassersektor zu finden.

Im Jahr 2010 fanden dann auch zwei weitere Treffen statt und zwar vom 2. bis 4. Juni 2010 in Murcia (Spanien) zu den landwirtschaftlichen Dürreindizes (19 Experten aus 8 Ländern) und vom 1. bis 2. September 2011 in Genf, Schweiz zu den hydrologischen Dürreindizes. Dabei wurde der Konsens erreicht, dass landwirtschaftliche Dürre durch Komposit-Indizes (wie z. B. den such *U.S. Drought Monitor*) gemessen werden sollte, welche Niederschlag, Bodenfeuchte, Temperatur, Boden- und Getreidetyp, Abfluss, Grundwasser, Schneedecke, etc. sowie historischen Aufzeichnungen von Dürreauswirkungen einbeziehen sollen (WMO 2010). Solche Indizes benötigen jedoch Daten, wie sie nur in einer Handvoll Staaten – zumeist in Nordamerika oder Teilen Afrikas – vorhanden sind. Deshalb werden bessere Bodeninformationen und die Etablierung eines Bodenfeuchte-Monitoringmessnetzes gefordert, v. a. in den Gebieten, wo dies bisher noch nicht vorliegt.

Landwirtschaftliche, hydrologische und Fernerkundungsinstitutionen sollen enger im Datenaustausch und Anwendungen zusammenarbeiten, sodass auch der Datenaustausch von verschiedenen Quellen und Institutionen sowie der Zugang zu einer Vielzahl an Wetter- und Bodendaten für das Dürremonitoring verbessert werden. Auch die Identifizierung hydrologischer Dürre wird durch Datenbeschränkungen und die Komplexität hydrologischer Modellierungen erschwert. Auf dem Treffen zu den hydrologischen Dürreindizes wurde keine Konsensempfehlung eines für das weltweite Monitoring hydrologischer Dürren zu verwendenden Index getroffen (HEIM & BREWER 2012). Dies hängt mit der komplexen Natur hydrologischer Dürren zusammen, dem Zeitverzug zwischen dem Auftreten meteorologischer Dürren und dem Einsetzen hydrologischer Auswirkungen, der Abhängigkeit hydrologischer Dürre von den Einzugsgebietseigenschaften und dem Einfluss von Managementpraktiken und Landnutzungsveränderungen. Es wurden jedoch einige hydrologische Dürreindizes vorgeschlagen wie Talsperrenstände, ein Niedrigwassereindex, ein Komposit-Hydro-Index und niederschlagsbasierte Indizes wie SPI und PN (STEFANSKI 2011).

3.3 Kategorisierung der Dürreindizes

Gewöhnlich werden Dürreindizes nach der Art der Auswirkungen, mit denen sie verbunden sind, in meteorologische, landwirtschaftliche und hydrologische Dürreindizes kategorisiert (ZARGAR et al. 2011). Diese Zuordnung ist jedoch nicht immer eindeutig und so kann derselbe Index je nach Sichtweise des jeweiligen Autors als meteorologischer, landwirtschaftlicher oder hydrologischer Dürreindex klassifiziert werden. Zusätzlich werden zum Teil auch die Kategorien umfassende (*comprehensive*), kombinierte oder fernerkundungsbasierte Dürreindizes (z. B. NIEMEYER 2008) verwendet. Umfassende Dürreindizes nutzen dabei eine Vielzahl an meteorologischen, landwirtschaftlichen und hydrologischen Variablen, um ein möglichst umfassendes Bild der Dürre zu erstellen. Zu dieser Kategorie gehört beispielsweise der Palmer Dürreschwereindex (PDSI). Kombinierte (auch hybride oder aggregierte Dürreindizes genannt) Dürreindizes werden durch die Zusammenfassung verschiedener Dürreindikatoren und -indizes in eine Maßzahl zusammengefasst. Dazu gehört beispielsweise der US Dürremonitor. Fernerkundungsbasierte Dürreindizes, wie z. B. der *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), nutzen Informationen von Fernerkundungssensoren, um den Zustand der Landoberfläche abzubilden.

In den nächsten Abschnitten werden basierend auf den genannten Kategorien die verschiedenen Dürreindizes kurz vorgestellt. Dazu werden im Wesentlichen Tabellen verwendet, welche neben dem Indexnamen, der gebräuchlichen Abkürzung und der Literaturreferenz auch die Berechnungsvorschriften, die Eingangsdaten inklusive deren zeitlicher Auflösung und die potenzielle Impactrelevanz auflistet. Weitergehende Informationen zu den gebräuchlichsten Indizes sind im Anhang darstellt. Als die sechs Hauptindizes, die weltweit am häufigsten im operationalen Einsatz sind, beschreiben ZARGAR et al. (2011) den Prozent-vom-Normalen Index, den Dezil-Index, den Standardisierten Niederschlagsindex SPI, den Palmer Dürreschwereindex PDSI, den US Dürremonitor und den *Normalized Difference Vegetation Index* NDVI. Diese Indizes sind dementsprechend besonders umfangreich dokumentiert.

Die Kategorie der meteorologischen Dürreindizes (Abschnitt 3.4) wird nach den verwendeten Eingangsdaten unterteilt in temperaturabgeleitete, niederschlagsbasierte und komplexere – sprich mehrere Klimaelemente und z. T. auch weitere Informationen wie z. B. Bodeninformationen einbeziehende – Dürreindizes. Diese Indizes sind je nach von ihnen adressierter Zeitskala teilweise auch für die Beschreibung landwirtschaftlicher oder hydrologischer Dürreauswirkungen geeignet. Abschnitt 3.5 stellt die typischen landwirtschaftlichen und Abschnitt 3.6 die hydrologischen Dürreindizes vor. Dabei wird deutlich, dass viele landwirtschaftliche Indizes auf einer Bewertung der Bodenfeuchte beruhen, während die meisten hydrologischen Indizes Abflussdaten bewerten. Die Zusammenstellung der auf Fernerkundungsdaten basierenden Indizes (Abschnitt 3.7) beinhaltet nur die gebräuchlichsten Indizes und ist nicht als umfassender Überblick über diese Kategorie an Dürreindizes zu verstehen. Einige kombinierte Dürreindizes, werden in Abschnitt 3.8 vorgestellt. Diese kombinierten Dürreindizes werden häufig von größeren Dürremonitoring- und Mitigationszentren (Abschnitt 3.10) verwendet. Weltweit wurden für verschiedene Regionen Vergleichsstudien zu verschiedenen Dürreindizes durchgeführt. Dabei werden meist der SPI oder der PDSI als Referenz genutzt. Zum Teil wird die Leistungsfähigkeit der Indizes über Korrelationsanalysen mit verschiedenen Impactindikatoren bewertet. Die wesentlichen Ergebnisse einer der bekanntesten Vergleichsstudien sind in Abschnitt 3.9 zusammen gestellt.

3.4 Meteorologische Dürreindizes

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Ansätze zur Definition meteorologischer Trockenheit vorgestellt, die auf unterschiedlichen Eingangsdaten basieren. Die einfachsten Definitionsansätze beruhen nur auf einem Klimaelement – meist Niederschlag (Abschnitt 3.4.3 und 3.4.1 für historische Ansätze), seltener Temperatur (Abschnitt 3.4.2). Diese simplen Ansätze ermöglichen eine erste Bewertung des Auftretens trockener Verhältnisse. In vielen Fällen können sie das Auftreten von Dürreereignissen auf ihrer jeweils adressierten Zeitskala schon recht zuverlässig beschreiben.

Weil eine Dürre jedoch durch eine Vielzahl an Klimafaktoren bzw. deren Kombination hervorgerufen bzw. verschlimmert werden kann, wurden Indizes entwickelt, die den Niederschlag und die Temperatur (bzw. die durch die Temperaturen bedingten Verdunstungsraten) zusammen betrachten (Abschnitt 3.4.5). Teilweise werden auch weitere Klimainformationen oder Umgebungsinformationen (z. B. Bodeninformationen, Landnutzung) in die Indizes einbezogen (Abschnitt 3.4.6). Damit wird potenziell eine immer genauere Beschreibung von Dürreereignissen möglich. Die Eignung des jeweiligen Indikators für die eigene Region und Anwendung muss jedoch immer unter Berücksichtigung des Vorhandenseins der jeweiligen Eingangsdaten, der Komplexität des Berechnungsprozesses und der Einfachheit der Interpretation der Index-Ergebnisse bewertet werden.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über 44 meteorologische Dürreindizes inklusive Angaben zur Berechnungsprozedur, zu den Eingangsdaten, zur zeitlichen Auflösung, zum Einsatzgebiet und weitergehenden Informationen. Für einen Großteil der Indizes sind detailliertere Informationen in Anlage 1 nachzulesen; ansonsten sei die jeweils angegebene (Original)Quelle empfohlen.

3.4.1 Historische Definitionsansätze

Schon früh im 20. Jahrhundert verwendete der US-Wetterdienst „Tage ohne Niederschlag“, um Dürre zu identifizieren und quantifizieren. So wurde Dürre beispielsweise als Zeitabschnitt von 21 Tagen mit 30 % oder mehr unter den Normalbedingungen für diesen Zeitabschnitt definiert (HENRY 1906, STEILA 1987). Als Erweiterung dieses Ansatzes wurden auch akkumulierte Niederschlagsdefizite oder akkumulierte Abweichungen vom Mittelwert betrachtet (SIVAKUMAR et al. 2011).

HEIM (2002) hat weitere dieser frühen Kriterien zur Dürredefinitionen zusammengestellt:

- 15 aufeinanderfolgende Tage ohne Niederschlag
- mindestens 21 Tage mit Niederschlägen von weniger als 1/3 des Normalwertes
- Jahres-/Monatsniederschlag liegt unterhalb von 75 % bzw. 65 % des Normalen (BATES 1935)
- jegliche Niederschlagssumme unterhalb von 85 % des Normalen (HOYT 1936)

In verschiedenen Ländern wurden/werden dabei unterschiedliche Definitionen und Schwellenwerte zur Dürredefinition basierend auf Niederschlagsdaten verwendet, wie z. B. in Indien: „*Der Niederschlag für eine Woche beträgt 50 % oder weniger des Normalwertes oder das Niederschlagsdefizit der aktuellen Jahreszeit beträgt mehr als die zweifache mittlere Abweichung.*“ (RAMDAS 1960) und in Libyen: „*Jahresniederschlagssumme von weniger als 180 mm*“ (CHOW 1964). Diese unterschiedlichen Definitionen spiegeln auch die unterschiedlichen klimatischen Gegebenheiten in den einzelnen Ländern wider. Sie sind daher auch nur für den speziellen Anwendungszweck und die Region, für die sie entwickelt wurden, gültig.

Als zwei weitere historische Indizes seien die von MUNGER (1916) und BLUMENSTOCK (1942) entwickelten Dürreindizes genannt. MUNGER (1916) entwickelte den MI als objektives Maß für den Vergleich des Waldbrandrisikos von Jahr zu Jahr und Region zu Region. Nachdem er festgestellt hatte, dass die Häufigkeit von durch-

nässenden Niederschlägen (*soaking rains*) das Waldbrandrisiko im pazifischen Nordwesten der USA am meisten beeinflussten, verwendete er die Aufeinanderfolge von Tagen mit Niederschlagssummen unter 1,27 mm (0,05 in.) als Dürreindex. Munger beobachtete, dass der austrocknende Effekt der Dürren auf die Waldvegetation nicht direkt proportional zur Andauer der Dürre war. Er nahm an, dass die Dürreintensität als Quadrat ihrer Andauer D ansteigt: Dürrestärke = $\frac{1}{2} D^2$. BLUMENSTOCK (1942) wendete die Wahrscheinlichkeitstheorie zur Berechnung von Dürrehäufigkeiten ein. Für seinen Dürreindex nutze er die Länge einer Dürre in Tagen, wobei eine Dürre durch das Auftreten einer Niederschlagssumme von mindestens 2,54 mm (0,01 in.) innerhalb von 48 Stunden beendet wird.

3.4.2 Temperaturabgeleitete Indizes

Auch wenn Dürren im Allgemeinen eher durch Niederschlagsdefizite verursacht und dementsprechend auch definiert werden, so gibt es auch vereinzelt Ansätze, temperaturabgeleitete Indizes zur Bewertung von Dürren einzubeziehen (SIVAKUMAR et al. 2011). Vor allem während der Vegetationsperiode können ausgedehnte Warmphasen (*warm spells*) durch die gesteigerte Evapotranspiration zur Ausprägung extrem trockener Zustände führen bzw. durch gleichzeitige Niederschlagsdefizite hervorgerufene Trockenzeiten intensivieren. Als Beispiel für einen temperaturabgeleiteten Dürreindex sei der *Warm Spell Duration Index* WSDI (ETCCDMI-Index) genannt (Anlage 1-1).

3.4.3 Rein auf Niederschlagsdaten basierende Ansätze

Trockenperioden werden auf verschiedene Weisen definiert. Es existieren keine einheitlichen Festlegungen, ab welcher Zeiträumlänge eine Trockenperiode beginnt bzw. ab welcher Niederschlagsmenge sie endet (z. B. BENDER & SCHALLER 2014). Sie sind nicht a priori niederschlagsfreie Zeitabschnitte. Es werden verschiedene Schwellenwerte verwendet, um zu definieren, welche gefallene Niederschlagssumme innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls nicht überschritten werden darf. Dabei gibt es für die Bestimmung eines trockenen Tages verschiedene Schwellenwerte. Einige Autoren bezeichnen einen Tag nur dann als trocken, wenn die Tagesniederschlagssumme gleich Null ist. Andere (z. B. FREYDANK 2001; BECK et al. 2004) verstehen einen Trockentag als Tag ohne hydrologisch wirksamen Niederschlag und setzen eine Tagessumme von 1 mm Niederschlag als Grenze an.

Prinzipiell werden die Auswirkungen einer Trockenperiode durch den Wasserbedarf gesteuert, weshalb die gleiche Trockenperiodenlänge in verschiedenen Jahreszeiten eine unterschiedliche Relevanz (bezogen auf die Auswirkungen) hat. In den Wintermonaten führen beispielsweise niedrige Luft- und Bodentemperaturen zu verminderten Verdunstungsraten, sodass selbst minimale Niederschlagsmengen nicht zu den Auswirkungen einer Trockenperiode führen, wie sie im Sommer vorkommen. Zeitweise können auch hohe Grundwasserstände fehlende Niederschlagsmengen ausgleichen, bis die Charakteristika einer Trockenperiode zu erkennen sind (BENDER & SCHALLER 2014).

Eine Zusammenstellung von 16 weltweiten Trockenperiodendefinitionen ist in Anlage 1-2 aufgeführt. Obwohl beispielsweise der Index CDD lediglich auf Basis von Niederschlagsmengen arbeitet, betrachtet er nicht ausschließlich die Auswirkungen meteorologischer Dürren, sondern kann auch relevant für andere Anwendungen sein (BENDER & SCHALLER 2014), weil sich Perioden ohne Niederschläge i. A. durch eine geringere Bewölkung auszeichnen. Daher gehen sie oft mit höheren Temperaturen einher, die wiederum größeren Evapotranspirationsraten führen können. Weitere auf Tagesniederschlagsdaten basierende Dürreindizes wie der Effektive Dürreindex' (*Effective Drought Index*, EDI; BYUN & WILHITE 1999; Anlage 1-4) sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die meisten Dürreindizes basieren jedoch nicht wie die bisher vorgestellten Indizes auf Tagesdaten, sondern auf Monatsdaten oder auf zu längeren Zeitintervallen aggregierten Monatsdaten. Besonders bekannte und häufig angewendete Dürreindizes sind

- Prozent-vom-Normalen (*Percent of Normal*, PN; Anlage 1-5),
- kumulative Anomalien (*cumulative precipitation deficit*, CPD; Anlage 1-6),
- Dezile (GIBBS & MAHER 1967; Anlage 1-8) und der
- Standardisierter Niederschlagsindex (*Standardized Precipitation Index*, SPI; MCKEE 1993; Anlage 1-13).

Diese und weitere auf Monatsniederschlagssummen basierende Indizes sind ebenfalls in Tabelle 2 dargestellt. Beispielhaft wird nachfolgend der Index, der am häufigsten als Referenz für Vergleichsstudien der Leistungsfähigkeit verschiedener Dürreindikatoren herangezogen wird, kurz vorgestellt – der ‚Standardisierte Niederschlagsindex‘ SPI. Dieser Index wurde zudem im Rahmen der Lincoln-Deklaration (HAYES et al. 2011) als universaler meteorologischer Dürreindex festgelegt und zur Verwendung durch alle meteorologischen und hydrologischen Dienste empfohlen.

Standardisierter Niederschlags-Index (*Standardized Precipitation Index*, SPI)

Der SPI ist eine abgeleitete Größe aus dem kumulierten Niederschlag, mit der abgeschätzt werden kann, wie nass oder trocken ein Zeitabschnitt im Vergleich zu den durchschnittlichen, sprich „normalen“, Niederschlagsverhältnissen ist. Er wurde in Colorado von MCKEE et al. (1993) entwickelt und basiert auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Niederschlags. Er benötigt weniger Eingangsdaten und hat einen geringeren Berechnungsaufwand als der PDSI. Trotz seiner geringeren Komplexität als der Palmer-Index kann er frühe Dürrewarnungen liefern und bei der Bewertung der Schwere einer Dürre helfen.

Durch die Standardisierung des SPI können trockenere und nasse Klimate in gleicher Weise repräsentiert werden. Zudem sind die Häufigkeiten bestimmter Dürrezustände (Dürrekategorien siehe Tabelle 1) durch die Normalverteilung festgelegt und die Seltenheit eines Dürreereignisses kann zuverlässig bestimmt werden. Die 2,3 % der SPI-Werte in der Klasse „extrem trocken“ sind dann auch wirklich als extremes Ereignis anzusehen (WILHITE 1995), was beispielsweise beim PDSI nicht immer gegeben ist, weil hier in einigen Regionen auch > 10% der Ereignisse in die extrem trockene Klasse fallen können.

Tabelle 1: Einteilung der SPI-Werte in Feuchtezustandskategorien (nach MCKEE et al. 1993, GUTTMAN 1999)

Index-Wert	Feuchtezustandsbeschreibung	Häufigkeit
SPI > 2	Extrem nass (<i>extremely wet</i>)	2,3 %
1,99 > SPI > 1,50	Sehr nass (<i>very wet</i>)	4,4 %
1,49 > SPI > 1,00	Moderat nass (<i>moderately wet</i>)	9,2 %
0,99 > SPI > 0	Leicht nass (<i>mildly wet</i>)	≈ 34 %
0 > SPI > -0,99	Leicht trocken (<i>mildly dry</i>)	≈ 34 %
-1,00 > SPI > -1,49	Moderate Trockenheit (<i>moderately dry</i>)	9,2 %
-1,50 > SPI > -1,99	Starke Trockenheit (<i>severely dry</i>)	4,4 %
SPI < -2	Extrem trocken (<i>extremely dry</i>)	2,3 %

Tabelle 2: Übersicht über meteorologische Dürreindizes

Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen	
Temperaturbasierte Indizes								
1	Warm-spell duration Index	WSDI	ETCCDMI (KARL et al. 1999)	jährliche Zahl an Tagen, wo an mind. 6 aufeinanderfolgenden Tagen $T_x > 90.$ Perzentil	T	t	<ul style="list-style-type: none"> Beschreibung von "Hitzewellen" Klimatrendanalyse 	Anlage 1-1
Niederschlagsbasierte Indizes								
2	Meteorologische Trockenperioden	MetTP	DIETZER (2001)	Aufeinanderfolge von mind. 11 Trockentagen mit $P \leq 1$ mm	P	t	<ul style="list-style-type: none"> Landwirtschaft/ Ökologie in sensiblen Entwicklungsphasen der Feldfrüchte/Vegetation beeinträchtigt 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-2 Verschiedenste Definitionen hinsichtlich des Schwellenwertes und der Andauer
3	Max. aufeinanderfolgender Trockentage <i>Consecutive dry days</i>	CDD	ETCCDMI (KARL et al. 1999)	Längste Aufeinanderfolge trockener Tage ($P < 1$ mm) pro Jahr	P	t	<ul style="list-style-type: none"> Klimatrendanalyse 	
4	Munger-Index	MI	MUNGER (1916)	Aufeinanderfolge von Tagen mit $P < 1,27$ mm (0,05 in.)	P	t	<ul style="list-style-type: none"> Waldbrandrisiko 	
5	Blumenstocks Index	BI	BLUMENSTOCK (1942)	$P(48h) < 2,54$ mm (0,01 in.)	P	t		
6	Vorläufer-Niederschlagsindex <i>Antecedant Precipitation Index</i>	API	MCQUIGG (1954)	Einbeziehung Indexwert des Vortages über Gewichtungsfaktor	P	t	<ul style="list-style-type: none"> Bodenfeuchte schätzen, Überschwemmungsvorhersage 	Anlage 1-3
7	Effektiver Dürreindex <i>Effective Drought Index</i>	EDI	BYUN & WILHITE 1999	<ul style="list-style-type: none"> Der EDI ist eine Funktion des für die Rückkehr zu normalen Bedingungen notwendigen Niederschlags (PRN) $EDI_k = PRN_k / s(PRN_k)$ mit $s(PRN_k)$: Standardabweichung der täglichen PRN Berechnung von PRN aus dem effektiven Niederschlag EP und dem Mittelwert der täglichen EP: $PRN_k = \frac{EP_k - MEP}{\sum_{N=1}^k (1/N)}$ <ul style="list-style-type: none"> Der effektive Niederschlag bezieht sich auf die Summation aller täglichen Niederschlagsdaten mit einer Zeitreduktionsfunktion. 	P	t	<ul style="list-style-type: none"> Echtzeit-Dürremonitoring in Korea 	Anlage 1-4
8	Akkumulation des reduzierten Niederschlags <i>Cumulation of reduced precipitation</i>	CRP	LU (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Erste Formulierung eines Index zur Messung des täglichen Überschwemmungs- und Dürreausmaßes: $CRP = \sum_{n=0}^N a^n P_n$ <ul style="list-style-type: none"> Das Ausmaß der Überschwemmung/Dürre an einem Tag wird durch den Niederschlag an diesem Tage sowie dem mittels des Faktors a ($0 - 1$) reduzierten Niederschlag der Vortage über den Zeitraum N hinweg bestimmt 	P	t	<ul style="list-style-type: none"> Operationelles Monitoring und Entscheidungsfindung benötigt Messung der täglichen Ausdehnung von Dürren/ Überschwemmungen Für die Untersuchung der räumlichen Variabilität in der Ausdehnung von Überschwemmungen und Dürren 	<ul style="list-style-type: none"> Verwendung eines einfachen physikalischen Modells Empirische Bestimmung des Parameters a basierend auf lokalen Charakteristika Unter Verwendung von Wetterprognosedaten Kurzzeitvorhersage zur weiteren Entwicklung bestehender Dürren bzw. Überschwemmungen
9	Gewichteter Mittelwert des Niederschlags <i>Weighted average of precipitation</i>	WAP	LU (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Zweite Formulierung eines Index zur Messung des täglichen Überschwemmungs- und Dürreausmaßes: $WAP = \frac{\sum_{n=0}^N a^n P_n}{\sum_{n=0}^N a^n}$ <ul style="list-style-type: none"> Vereinfachte Schreibweise: $WAP = \sum_{n=0}^N \omega_n P_n \text{ mit } \omega_n = (1-a)^n$	P	t	<ul style="list-style-type: none"> Untersuchung der zeitlichen Variabilität von Überflutungs- und Dürreereignissen 	<ul style="list-style-type: none"> Weniger durch den Parameter a beeinflusst als CRP Vorteil gegenüber SPI: unter Nutzung bestimmter Kriterien kann der Startzeitpunkt und die Dauer einer Überschwemmung bzw. Dürre sowie deren Unterbrechungen detektiert werden
10	Prozent-vom-Normalen <i>Percent of Normal</i>	PN	-	<ul style="list-style-type: none"> Verhältnis des beobachteten Niederschlags zum klimatologischen Mittel: $PN = P / \bar{P} \times 100\%$	P	universal	<ul style="list-style-type: none"> klimatologische Bewertung 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-5 Basierend auf diesem Indikator sind verschiedenste Dürredefinitionen möglich Für viele Anwender intuitiv verständlich; jedoch Fehlinterpretationsgefahr, wenn Klimatologie nicht hinreichend berücksichtigt

	Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen
11	Kumulative Niederschlagsdefizite <i>Cumulative precipitation deficit</i>	CPD	-	<ul style="list-style-type: none"> Aufsummieren von Niederschlagsanomalien: $CPD_n = \sum (\bar{P} - P_n)$ für $P_n < \bar{P}$ 	P	m	<ul style="list-style-type: none"> Identifizierung meteorologischer Langzeitdürren 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-6 auf direktem Weg schwierig zu interpretieren (Anstieg, nicht Vorzeichen, ist entscheidend)
12	Niederschlagsanomalien-Index <i>Rainfall Anomaly Index</i>	RAI	VAN ROOY (1965)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnet aus dem aktuellen Niederschlag P, dem Langzeitmittel \bar{P} und dem Mittelwert der zehn Prozent größten bzw. kleinsten Niederschlagsereignissen \bar{E}: $RAI = \pm 3 \frac{P - \bar{P}}{\bar{E} - \bar{P}}$ 	P	m+	<ul style="list-style-type: none"> ähnlich SPI 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-7 ähnliche Ergebnisse wie SPI (z.B. Hänsel et al. 2014) Unterschiede zu PDHI und BMDI vernachlässigbar (OLAPIDO 1985)
13	Mittleres monatliches Niederschlagsdefizit <i>Mean Monthly Rainfall Deficit</i>	MMD	HERBST et al. (1966)	<ul style="list-style-type: none"> Monatsweise Berechnung des effektiven Niederschlags EP durch Verwendung von Gewichtungsfaktoren zur Berücksichtigung des Niederschlagsüberschusses oder -defizites der vorangegangenen Monate $MMD = EP - \bar{P}$ 	P	m		
14	Dezile	DI	GIBBS & MAHER (1967)	<ul style="list-style-type: none"> Einteilung der historischen Niederschlagsverteilung in Dezile 	P	m+	<ul style="list-style-type: none"> australisches <i>Drought Watch System</i> im Rahmen von Dürreentschädigungsprogrammen genutzt 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-8 Ansatz überwindet einige inhärente Probleme im PN-Dürreindex (Bedarf einer normalisierten Niederschlagsverteilung)
15	BHALME-MOOLEY Dürreindex <i>BHALME-MOOLEY drought index</i>	BMDI	BHALME & MOOLEY (1980)	<ul style="list-style-type: none"> basierend auf der prozentualen Abweichung vom Langzeitniederschlagsmittel: $BMDI = \frac{1}{k} \cdot \sum_{k=1}^k I_k$ mit dem monatlichen Index I_k: $I_k = c_1 I_{k-1} + c_0 M_k$ und $i_0 = 0$ und der standardisierten Niederschlagsmenge M_k (<i>moisture index</i>) für den Monat k: $M_k = \frac{p_k - \bar{p}_k}{s_k}$ Hierbei ist p_k der monatliche Niederschlag mit dem Mittelwert \bar{p}_k und der Standardabweichung s_k. 	P	m	<ul style="list-style-type: none"> Rangfolge von Monsoondürren (jedoch auch auf Ganzjahresdürren ausgeweitet) 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-9 Auch als vereinfachte Version des PDSI bezeichnet Schätzung der Koeffizienten c_1 und c_0 für Festlegung des Wertebereichs entsprechend PDSI (-4 bis +4)
16	Standardisierter Anomalien-Index <i>Standardized Anomaly Index</i>	SAI	KATZ & GLANTZ (1986)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnet aus dem Jahreszeitenniederschlag P mit dem Langzeitmittelwert \bar{P} und der Standardabweichung σ: $SAI = \frac{P - \bar{P}}{\sigma}$ 	P	m+	<ul style="list-style-type: none"> v.a. in den dürreanfälligen Gebieten der westlichen Sahelzone und dem Nordosten Brasiliens 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-10
17	NOAA-Dürreindex <i>NOAA drought Index</i>	NDI	STROMMEN & MOTH (1987)	<ul style="list-style-type: none"> $P(8\text{-Wochen}) < 60\%$; bei vorliegender Dürre Verlängerung des Zeitraums und Vergleich zum jeweiligen Normalwert bis $P(8+x\text{-Wochen}) > 60\%$ 	P	w	<ul style="list-style-type: none"> Frühwarnsystem für landwirtschaftliche Dürre in Entwicklungsländern 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-11
18	HUTCHINSON'S Dürreschwereindex <i>HUTCHINSON drought severity index</i>	HDSI	SMITH et al. (1992)	<ul style="list-style-type: none"> Perzentile für 6-Monatsniederschläge Reskalierung der Daten auf Bereich -4 bis +4 (wie PDSI) 	P	m	<ul style="list-style-type: none"> landwirtschaftliche Dürren 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-12
19	Relative Dürrewiderstandsmethode <i>Relative Drought Resistance Methode</i>		ROUX (1993)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung des meteorologischen Status: Niederschlagssumme für festgelegte Periode ausgedrückt in % vom Normalen Berechnung des Bezugszeitraumes aus der relativen Dürrewiderstandsfähigkeit des Gebietes: $RDR = \bar{P}_{annual} - \text{Var}(P_{annual})$ 	P	m		<ul style="list-style-type: none"> Je größer der Jahresniederschlag und je geringer die Niederschlagsvariabilität, desto weniger dürretolerant ist die Vegetation (und umgekehrt) und desto schneller (langsamer) wird sich eine Dürre entwickeln
20	Standardisierter Niederschlagsindex <i>Standardized Precipitation Index</i>	SPI	McKEE et al. (1993)	<ul style="list-style-type: none"> Anpassung einer Verteilung (zumeist Gamma-Verteilung) an die Niederschlagsmenge (Häufigkeiten basierend auf Langzeitniederschlagsdatenreihen) Standardisierung auf Mittelwert = 0 und Standardabweichung = 1 Festlegung von Dürrekategorien (< -2: extreme Dürre; -2 bis $-1,5$ starke Dürre; $-1,5$ bis -1: moderate Dürre; etc.) 	P	m+ (1-72)	<ul style="list-style-type: none"> Zeitskalenabhängig → siehe Übersicht in Tabelle 3 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-13 Verschiedene Verteilungsfunktionen für die Transformation der Niederschlagsdaten in eine Normalverteilung untersucht und möglich

	Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen
21	Nationaler Niederschlagsindex <i>National Rainfall Index</i>	RI	GOMMES & PETRASSI (1994)	<ul style="list-style-type: none"> nationaler Mittelwert des jährlichen Niederschlages, gewichtet mit seinem Langzeitmittelwert verdeutlicht Muster und Anomalien im Jahresniederschlag auf der kontinentalen Skala (BYUN & WILHITE 1999) 	P	y	<ul style="list-style-type: none"> Qualität der Agrarsaison 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-14 Definition als nationaler Wert → Vergleich zwischen Ländern u. Jahren sowie mit anderen nationalen statistischen Indikatoren möglich
22	Dürreschwereindex <i>Drought Severity Index</i>	DSI	PHILLIPS & MCGREGOR (1998)	<ul style="list-style-type: none"> DSI-3 (3 Monate) und DSI-6 (6 Monate) Dürre beginnt bei negativer Anomalie des Monatsniederschlags und der 3/6-Monatsniederschlagssumme: $DSI3_t = DSI_{t-1} - (P_t - \bar{P}_t) \text{ solange } P_{t-t-1,t-2} - \bar{P}_{t-t-1,t-2} < 0;$ sonst $DSI_t = 0$ Standardisierung des Index mit dem mittleren Jahresniederschlag P_a: $DSI3_s = DSI3 / P_a \times 100$ 	P	m	<ul style="list-style-type: none"> häufig im Vereinigten Königreich Großbritannien verwendet 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-15 DSI3: kann sich entwickelnde Niederschlagsdefizite schnell entdecken, tendiert jedoch dazu Dürresequenzen frühzeitig abubrechen DSI6: tendenziell persistenterer Dürren; zuverlässigeres Maß der Dürreschwere
23	Standardisierter Niederschlagsindex gewichteter Anomalien <i>Weighted Anomaly Standardized Precipitation index</i>	WASP	LYON (2004)	<ul style="list-style-type: none"> Schätzer des relativen Niederschlagsdefizites oder -überschusses für unterschiedliche Zeitskalen (1-12 Monate) $S_{12} = \sum \left(\frac{\log P_i - \log \bar{P}_i}{\sigma_i} \right) \cdot \frac{\bar{P}_i}{P_A}$ <p>P_i: Niederschlagssumme des i-ten Monats P_A: Gesamtjahresniederschlagssumme σ_i: Standardabweichung der Anomalien des Logarithmus des monatlichen Niederschlags Überstriche symbolisieren klimatologische Mittelwerte</p> Verwendung des Gewichtungsfaktors \bar{P}_i / P_A (Monatsanteil am Jahresniederschlag), um große standardisierte Anomalien zu dämpfen, die aus geringen Niederschlagsmengen nahe des Beginns/Endes der Trockensaison resultieren Standardisierung der S12-Werte (gleiches Wertespektrum wie SPI (von -2: schwere Dürre bis +2: extreme Feuchte) 	P	m (1-12)	<ul style="list-style-type: none"> Verwendet für die Analyse der zeitlichen Variabilität in der räumlichen Ausdehnung von Dürren Untersuchung von Veränderungen in der Beziehung zwischen El Niño-Ereignissen und der räumlichen Ausdehnung von Dürren 	<ul style="list-style-type: none"> Gut korreliert mit anderen Trockenheitsindizes wie z.B. PDSI und SPI

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, TX – maximale Lufttemperatur, TN – minimale Lufttemperatur, ETP – potenzielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z. B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m - monatlich

	Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen
Indizes basierend auf Niederschlag und Temperatur (bzw. Verdunstung)								
24	Trockenheitsindex nach DE MARTONNE	dMI	DE MARTONNE (1926)	<ul style="list-style-type: none"> dMI = $P / (T+10)$ wobei P: Niederschlag des Bezugszeitraums in mm und T: Mitteltemperatur des Bezugszeitraums in °C. Durch den Faktor 10 im Nenner sollen negative Nenner möglichst vermieden werden 	P, T	t, m	<ul style="list-style-type: none"> pflanzenphysiologische Wirkung des Niederschlags in unterschiedlichen Klimaten bewerten 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-16 ähnliche Ergebnisse wie KBW vom DWD angewandt
25	MARCOVITCH-Index	MDI	MARCOVITCH (1930)	<ul style="list-style-type: none"> MDI = $\frac{1}{2}(N/P)^2$ N: Gesamtanzahl von mind. zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit $T > 32,2^\circ\text{C}$ (90°F), P: Gesamtsommerniederschlag 	P, T	t(T), m(P)	<ul style="list-style-type: none"> Klimaanforderungen des Bohnenkäfers in den östlichen USA 	<ul style="list-style-type: none"> saisonalen Index, der am besten in retrospektiven Studien verwendet wird
26	Klimatische Wasserbilanz	KWB	KUHNKE (1936), THORNTHWAITE (1948)	<ul style="list-style-type: none"> Gegenüberstellung von Niederschlagssumme (korrigiert) und potentieller Verdunstung im Betrachtungszeitraum KWB = P – ETP 	P, PET	t/m	<ul style="list-style-type: none"> operationales Dürremonitoring im Nordosten der USA (LEATHERS & ROBINSON 1995, LEATHERS 1997) 	<ul style="list-style-type: none"> Zur Beschreibung von Trockenstress wird in der Regel die Länge von Perioden mit negativer KWB verwendet (z.B. KREIENKAMP 2011)
27	Hydro-thermaler Selyaninov-Koeffizient	HTC	SELYANINOV (1937)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung gleitend auf der Basis von Tageswerten oder für die gesamte Wachstumssaison HTC = $P / 0,1 \sum T$ für $T > 5^\circ\text{C}$ (oder $T > 10^\circ\text{C}$, z.B. MESHCHERSKAYA & BLAZHEVICH 1997) P: Niederschlag des Bezugszeitraums in mm und T: Tagesmitteltemperatur in °C 	P, T	t; m	<ul style="list-style-type: none"> Charakterisierung der Wachstums-saison 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-17 vom DWD auf Kundenwunsch angewandt bewertet nur die Trockenheit in der Wachstumssaison wobei für deren Definition unterschiedliche Temperaturschwellenwerte in Verwendung sind
28	Index nach REICHEL	RI	REICHEL (1928, 1938)	<ul style="list-style-type: none"> Weiterentwicklung des dMI, zur Einbeziehung der Verteilung der Niederschläge RI = $P / (T+10) k/120$ mit k = Anzahl der Tage mit $\geq 1,0$ mm Niederschlag 	P, T	t		<ul style="list-style-type: none"> Zahl 120 im Nenner repräsentiert die mittlere Zahl der Niederschläge in Deutschland (kann regional angepasst werden)
29	Keetch-Byram Dürreindex <i>Keetch-Byram drought index</i>	KBDI	KEETCH & BYRAM (1968)	<ul style="list-style-type: none"> basiert auf einer täglichen Wasserbilanz, wo ein Dürrefaktor dem Niederschlag und der Bodenfeuchte (Annahme einer maximaler Speicherkapazität von 8 Inch) gegenübergestellt wird Abschätzung des Verhältnisses zwischen dem Feuchteverlust des Bodens und dem Laubstreuanteil angegeben in Hundertstel Inch Bodenfeuchteabnahme Wertebereich von 0 – gesättigter Boden bis 800 – extreme Dürre 	P, Tx	t	<ul style="list-style-type: none"> zur Bestimmung der Waldbrandgefahr 	<p>typische KBDI-Wertebereiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> 0–200: hohe Bodenfeuchte → geringe Feueregefahr (typisch für Frühlingsanfang) 200–400: tiefere Auflage und Humusschichten trocknen aus (typisch für Frühlingsende) 400–600: tiefere Auflage und Humusschichten tragen aktiv zur Feuerintensität bei (typisch für Spätsommer) 600–800: oft mit schwerwiegenden Dürren und erhöhter Waldbrandhäufigkeit verbunden – auch lebender Brennstoff brennt aktiv
30	Index von PED PED's index	Si	PED (1975)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung des Trockenheitsindex Si aus den Anomalien von Temperatur und Niederschlag sowie deren Standardabweichungen σ: $S_i = \frac{T - \bar{T}}{\sigma_{\Delta T}} - \frac{P - \bar{P}}{\sigma_{\Delta P}}$	P, T	m		<ul style="list-style-type: none"> Enge Korrelation mit HTC (MESHCHERSKAYA et al. 1981)
31	Dürreindex für Waldschäden		KÖNIG & MAYER (1989)	<ul style="list-style-type: none"> mind. 10 aufeinanderfolgende Tage mit P < 5 mm/d und $T_m > 20^\circ\text{C}$ 	P, T	t	<ul style="list-style-type: none"> entwickelt zur Untersuchung klimatisch bedingter Waldschäden 	
32	Trockenheitsindex nach BRUSCHEK		BRUSCHEK (1994)	<ul style="list-style-type: none"> jährlicher Index aus der Niederschlagssumme, dividiert durch die Anzahl der Sommertage ($T_x > 25^\circ\text{C}$) 	P, Tx	t	<ul style="list-style-type: none"> Als Waldbrandindex verwendet 	
33	Trockenindex nach HARLFINGER & KNEES	HKI	HARLFINGER & KNEES (1999)	<ul style="list-style-type: none"> HKI = $3T / P$ T [°C] = Mitteltemperatur °C im Betrachtungszeitraum P [mm] = Niederschlagssumme im Betrachtungszeitraum 	P, T		<ul style="list-style-type: none"> Konzipiert für die Überarbeitung der Bodenschätzung in Österreich, um lokale klimatische Bedingungen besser zu berücksichtigen 	<ul style="list-style-type: none"> im Gegensatz zu anderen Indizes repräsentieren hier größere Werte Trockenheit negative Indexwerte bei neg. Temperaturen (kaum Verdunstung → geringe Dürregefahr)
34	Reconnaissance Dürreindex <i>Reconnaissance drought index</i>	RDI	TSAKIRIS & VANGELIS (2005)	<ul style="list-style-type: none"> Verhältnis von P zu ETP Erscheint in drei Stufen: dem Ausgangswert a_k, $a_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_j}{\sum_{j=1}^{j=k} ETP_j}$ <ul style="list-style-type: none"> dem normalisierten RDI_n 	P, ETP	m	<ul style="list-style-type: none"> ähnlich SPI jedoch bessere Verbindung zu hydrologischer und landwirtschaftlicher Dürre 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-18 Schwierigkeiten bei sehr kleinen PET-Werten (→ in kalten Klimaten nicht anwendbar) RDI-12 kann direkt mit dem Ariditätsindex (berechnet nach UNEP 1992) verglichen werden

				$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1$ <ul style="list-style-type: none"> ■ und dem standardisierten RDI_{st}. $RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_k} - 1 \text{ mit } y_k = \ln a_k.$ <p>Dabei ist \bar{y}_k der Mittelwert und $\hat{\sigma}_k$ die Standardabweichung von y_k.</p>				
35	Niederschlag-Potentielle Evaporation-Anomalie <i>Precipitation Potential Evaporation Anomaly</i>	PPEA	BURKE & BROWN (2008)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schätzung meteorologischer Dürre mittels: $PPEA = (P - \bar{P}) - (ETP - \overline{ETP})$ mit P/ETP = Mittelwerte des Niederschlags/ der potentiellen Evapotranspiration für die vorangegangenen 12 Monate Oberstrich symbolisiert klimatologische Mittelwerte für mind. 20 Jahre 	P, ETP	m		
36	Standardisierter Niederschlags-Evapotranspirationsindex <i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i>	SPEI	VICENTE-SERRANO et al. (2010a)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anwendung des SPI-Konzeptes auf die klimatische Wasserbilanz 	P, PET	m (1-72)	<ul style="list-style-type: none"> ■ wie SPI (im Mittel etwas bessere Korrelationen zu Impactgrößen) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anlage 1-20 ■ ähnliche Ergebnisse wie SPI; (z.B. VICENTE-SERRANO et al. 2012a) ■ vergleichbare Ergebnisse wie PDSI auf Zeitskalen zwischen 12 und 18 Monaten (z.B. VICENTE-SERRANO et al. (2010b))
37	Akkumulierter Dürreindex <i>Accumulated drought index</i>	ADI	SIVAKUMAR et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> ■ DI: Bewertung des Verhältnisses von Niederschlag und Evapotranspiration (Klassen von 1: trocken bis 5: nass): $ADI = \sum DI / (3 n N)$ ■ Dabei ist N die Zahl der Zeitschritte mit Niederschlägen > 10 mm. Für N = 0 wird der ADI berechnet durch: $ADI = \sum DI / (3 n)$ 	P, PET	m(?)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Landwirtschaftliche Dürre 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anlage 1-19
38	Global anwendbarer Dürreindex	GPCC-DI	ZIESE et al. (2014)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kombination von SPI und SPEI, um die Schwächen beider Indizes in verschiedenen Regionen auszugleichen 	P, PET	m (1-72)	<ul style="list-style-type: none"> ■ wie SPI 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anlage 1-21 ■ vom DWD/GPCC weltweit bereitgestellt

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, TX – maximale Lufttemperatur, TN – minimale Lufttemperatur, ETP – potenzielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z. B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m - monatlich

Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen	
Komplexere meteorologische Indizes								
39	PRESCOTT (<i>Ratio</i>) Index	PI	PRESCOTT (1948)	<ul style="list-style-type: none"> PI = $0,445 P/E^{0,75}$ P: Langzeitniederschlag (mittlere Monatswerte) E: Langzeitmittel der potentiellen Verdunstung P / E mit P = Niederschlag und E = Verdunstung 	P, E	m	<ul style="list-style-type: none"> Identifizierung von Perioden des Pflanzenstresses Quantitativer Prediktor der Bodeneigenschaften Maß für die Intensität des Auslaugens des Boden durch überschüssiges Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> weniger gut für ein exaktes Monitoring von Feldfrüchten und deren Verlusten geeignet, da er die Transpiration nicht berücksichtigt. in Australien verwendet
40	PALMERS Dürreschwereindex <i>Palmer drought (severity) index</i>	PDSI (PDI)	PALMER (1965)	<ul style="list-style-type: none"> berechnet basierend auf monatlichen Niederschlags- und Temperaturdaten sowie dem lokal verfügbaren Wassergehalt (AWC) des Bodens Nutzung eines Zwei-Schicht-Boden-Modells Bestimmung der grundlegenden Terme der Wasserhaushaltsgleichung (einschl. Evapotranspiration, Bodenwasseranreicherung, Abfluss und Feuchtigkeitsverlust aus der Oberflächenschicht) 	P, T, ETP, Q, BF/AWC	m	<ul style="list-style-type: none"> durch viele U.S. Regierungsbehörden und Staaten im Rahmen des Managements, der Planung sowie des Monitoring von Dürren eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-22 Menschliche Einflüsse auf die Wasserbilanz (z.B. Bewässerung) nicht berücksichtigt Vernachlässigung Schnee-Akkumulation, Schneeschmelze, Einfluss gefrorener Böden weitere Einschränkungen/ Nachteile
41	Modifizierter PDSI	mPDSI	HEDDINGHAUS & SABOL (1991)	<ul style="list-style-type: none"> unterscheidet sich während der Übergangszeiträume zwischen Nass- und Trockenphasen von der ursprünglichen Variante 	P, T, ETP, Q, BF/AWC	m	<ul style="list-style-type: none"> für den operationellen Einsatz des PDSI 	<ul style="list-style-type: none"> vom <i>National Weather Service Climate Analysis Center for operational meteorological purposes</i> vorgeschlagen
42	PÁLFAI'S Ariditätsindex <i>PÁLFAI Aridity Index</i>	PAI	PÁLFAI (1991)	<ul style="list-style-type: none"> Dürreschwere anhand von Niederschlags-, Temperatur- und Grundwasserdaten bewertet 	P, T, GW		<ul style="list-style-type: none"> Für die Klimabedingungen in Ungarn bzw. dem Karpatischen Becken 	<ul style="list-style-type: none"> hauptsächlich In Ungarn angewandt
43	Selbstkalibrierender PDSI (scPDSI)	scPDSI	WELLS et al. 2004	<ul style="list-style-type: none"> in der Berechnungsprozedur werden alle empirischen Konstanten Palmer's ersetzt Nutzung des 2. und 98. Perzentils des PDSI 	P, T, AWC	m	<ul style="list-style-type: none"> wie PDSI 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-23 Im Gegensatz zum PDSI ist die Sensitivität des Index nun an das lokale Klima gekoppelt
44	Wasserbilanzindex mit zwei Speichern		CLOPPET et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Index basiert auf einer vereinfachten, operationalen Wasserbilanz mit zwei Speichern und einer festgesetzten Bodentiefe Berücksichtigung von vier Bodentypen Dürrebewertung basierend auf dem Vergleich von modelliertem Bodenwassergehalt mit verschiedenen statistischen Schwellenwerten (perzentilbasiert) 	P, PET, BI	T,m	<ul style="list-style-type: none"> Ziel des Werkzeugs ist eine synthetische Sicht auf die Wasserbilanz ohne Boden- und Pflanzeninteraktionen 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 1-24 berechnet für Gesamtfrankreich unter Annahme von Schwingelgras vom grundsätzlichen Ansatz her schon in Richtung landwirtschaftlicher Dürreindex (jedoch andere Zielstellung)

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, TX – maximale Lufttemperatur, TN – minimale Lufttemperatur, ETP – potenzielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z.B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), etc.), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m - monatlich

Der Hauptvorteil des SPI gegenüber den Palmer Indizes ist die Möglichkeit der Analyse von Dürreauswirkungen auf unterschiedlichen Zeitskalen (EDWARDS & MCKEE 1997). Damit ist der SPI in der Lage, unterschiedliche Dürretypen zu identifizieren, weil verschiedene Systeme und Regionen auf Dürrebedingungen auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen reagieren können. Der SPI wird im Allgemeinen für verschiedene Zeitschritte zwischen 1 und 48 Monaten (potenziell auch bis 72 Monate) berechnet, wodurch die Auswirkungen des Niederschlagsdefizits in verschiedenen Wasserspeicherkomponenten (Grundwasser, Reservoirspeicherung, Bodenfeuchtigkeit und Abfluss) bewertet werden können. Aufgrund dieser Vielseitigkeit schätzen viele Dürreplaner den SPI. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die potenziellen Auswirkungen sowie Interpretationshinweise des SPI auf unterschiedlichen Zeitskalen

Tabelle 3: Hinweise zur Interpretation des SPI auf unterschiedlichen Zeitskalen³

SPI – Zeitskala	Beschreibung des Dürrezustandes	Potenzielle Auswirkungen	Interpretationshinweise	Vergleich zu Palmer-Indizes
1-Mon.	Kurzzeit-zustand	<ul style="list-style-type: none"> kurzzeitige Bodenfeuchte und Stress für die Feldfrüchte (insb. in der Wachstumssaison) 	<ul style="list-style-type: none"> Verständnis der regionalen Klimatologie ist wichtig – sonst Fehlinterpretationen möglich für kleine Mittelwerte sind die positiven und negativen Abweichungen groß (der gleiche SPI-Wert kann daher mit sehr unterschiedlichen Auswirkungen verbunden sein) 	<ul style="list-style-type: none"> kann die durch den CMI repräsentierten Bedingungen annähern
3-Mon.	Kurz- und mittelfristiger Feuchtigkeitszustand	<ul style="list-style-type: none"> jahreszeitlicher Schätzer des Niederschlags 	<ul style="list-style-type: none"> Vergleich zu den Dürrezuständen auf längeren Zeitskalen notwendig (z. B. Einbettung „normaler“ SPI-3 Werte in eine Langzeitdürre) wie der SPI-1 irreführend in Regionen mit geringen mittleren Dreimonatsniederschlägen 	<ul style="list-style-type: none"> besser anwendbar für die Hervorhebung der verfügbaren Feuchtigkeit als der langsam reagierende Palmer-Index (PDSI)
6-Mon.	Mittelfristige Entwicklungen im Niederschlag	<ul style="list-style-type: none"> beginnende Anomalien im Abfluss oder den Talsperrenfüllung sind möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Dürren brauchen i. d. R. mindestens eine Jahreszeit, um sich zu entwickeln. 	<ul style="list-style-type: none"> sensitiver gegenüber den Feuchtigkeitsbedingungen als der PDSI
9-Mon.	Niederschlagsmuster über eine mittlere Zeitskala	<ul style="list-style-type: none"> SPI-9 < -1,5 → oft erhebliche Auswirkungen in der Landwirtschaft (und anderen Sektoren) 	<ul style="list-style-type: none"> Dürren brauchen i. d. R. mindestens eine Jahreszeit, um sich zu entwickeln. 	<ul style="list-style-type: none"> für einige Gebiete den Ergebnissen des PDSI sehr ähnlich
12-Mon.	Langzeit-Niederschlagsmuster	<ul style="list-style-type: none"> wahrscheinlich an Abflüsse, Talsperrenfüllung und z. T. Grundwasserstände gebunden 		<ul style="list-style-type: none"> für einige Gebiete den Ergebnissen des PDSI sehr ähnlich

Weitere Informationen zur Eignung des SPI für die Bewertung des Dürreimpactes auf die Landwirtschaft, die Ökologie und die Hydrologie sowie zu Verbesserungen des Index für verschiedene Regionen sind in Anlage 1-13 aufgeführt.

Ein Dürreereignis beginnt, wenn der SPI zu einem Zeitpunkt den Wert -1,0 unterschreitet. Die Dürre endet, wenn der SPI wieder positive Werte erreicht. Die positive Summe des SPI für alle Monate innerhalb der Dürreperiode wird als Dürrestärke (drought magnitude) bezeichnet (HAYES 2000). Für die Berechnung des SPI

³ <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/ClimateDivisionSPI/Interpretation/> > (10 November 2014)

werden monatliche Niederschlagsdatenreihen von mindestens 20–30 Jahren Länge (optimal 50–60 Jahre) benötigt (GUTTMAN 1994).

Durch die WMO werden Standardrichtlinien und eine Software zur Berechnung des SPI bereitgestellt (WMO 2012).

3.4.4 Bewertung niederschlagsbasierter Indikatoren

Die folgenden Aussagen basieren im Wesentlichen auf den Ergebnissen des WMO-Expertentreffens zu landwirtschaftlichen Dürreindizes vom 2. bis 4. Juni 2010 in Murcia, Spanien (SIVAKUMAR et al. 2011).

Auch wenn die praktischen und funktionalen Aspekte der (alleinigen) Verwendung meteorologischer Dürreindizes anerkannt sind, so ist doch auch bekannt, dass v. a. für landwirtschaftliche Anwendungen die Quantität und das Timing der Niederschlagsereignisse innerhalb der Wachstumsaison den Wert derartiger Indizes in der Bewertung landwirtschaftlicher Produktion bestimmen. Auch wenn meteorologische Trockenheitsindizes durch die Verwendung passender saisonaler Indizes normalisiert werden können, so berücksichtigen solche rein niederschlagsbasierten Indizes per Definition keine weiteren wesentlichen Klima- und Umgebungsfaktoren (WHITE & WALCOTT 2009).

Damit basieren sie auf der Annahme, dass die Dürren hauptsächlich durch die zeitliche Variabilität des Niederschlags bestimmt sind. Auch wenn die Grundannahme, dass die Variabilität des Niederschlags viel größer ist als die anderer die Dürrebedingungen kontrollierender Faktoren (wie Temperatur, relative Luftfeuchte, Evapotranspiration, Windgeschwindigkeit etc.) zumeist erfüllt ist, so ist die zweite Grundannahme der zeitlichen Stationarität der anderen Variablen im Hinblick auf die derzeitige globale Erwärmung kritisch zu sehen. Vor allem im Rahmen der durch Klimamodelle projizierten Temperaturanstiege im 21. Jahrhundert ist mit dramatischen Auswirkungen für die Dürrebedingungen zu rechnen. Rein auf Niederschlagsdaten basierende Indizes würden in diesem Falle das Dürrierisiko zum Ende des 21. Jahrhunderts unterschätzen. Daher erscheint es für die Identifikation von mit der globalen Erwärmung verbundenen Dürreauswirkungen auf verschiedene ökologische, hydrologische und landwirtschaftliche Systeme sinnvoll, eher Indizes zu betrachten, welche die Temperaturinformation mit einbeziehen.

Weil die Länge der Wachstumsperiode von Jahr zu Jahr variieren kann, bleibt das Zuschneiden der Dürreindizes auf die Wachstumsphase – zur besseren Bewertung, inwieweit Trockenheit die Äcker und Weiden beeinträchtigt – eine schwierige Aufgabe. Gerade zur Bewertung landwirtschaftlicher Dürren sollten daher nicht ausschließlich meteorologische Dürreindikatoren verwendet werden. So haben beispielsweise WHITE et al. (1998) und WHITE (2000) gezeigt, dass abgesehen vom Niederschlag auch andere meteorologische Faktoren das Pflanzenwachstum in einem Land wie Australien in unvorhersehbarer Art und Weise beeinflussen können.

Simulationsstudien (z.B. DONNELLY et al. 1998, SMITH & MCKEON 1998, WHITE et al. 1998) haben gezeigt, dass Grassland- und landwirtschaftliche Dürren häufig mit meteorologischen Dürren, wie sie durch Niederschlagsdefizite abgebildet werden, zusammentreffen. Jedoch können die Schwere und die Dauer von Grassland- und landwirtschaftlichen Dürren in einem Land wie Australien entsprechend des Timings und der räumlichen Verteilung der Niederschläge variieren. Die Autoren weisen darauf hin, dass auch ein geringfügiges Niederschlagsdefizit in einigen Fällen große Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion haben kann, wohingegen moderate Niederschlagsdefizite nicht immer zu schwerwiegenden Ernteeinbußen und verringertem Weidewachstum führen müssen. Daher sind solche zusätzlichen Modelle oft von unschätzbarem Wert in der Dürrebewertung.

Die Modifizierung von Dürreindizes, wie beispielsweise leichte Modifikationen an Indizes wie dem SPI, kann ihre praktische Anwendbarkeit in bestimmten Regionen erhöhen (NTALE & GAN 2003). So ist durch diese Modifikation der SPI anderen Indikatoren wie dem BMDI und dem PDSI in verschiedenen Regionen Ostafrikas überlegen.

3.4.5 Indizes basierend auf Niederschlags- und Temperaturdaten (bzw. der potenziellen Verdunstung)

Weil Dürre insbesondere im Sommer durch das Auftreten hoher Temperaturen und somit einer gesteigerten Evapotranspiration verschlimmert werden kann, beziehen eine Reihe von Indizes neben der Niederschlagsinformation auch Temperaturdaten ein. Dies hilft, die potenzielle Verdunstung als Gegenpol zu den fallenden Niederschlägen einzubeziehen. Aufgrund des häufig begrenzten Vorliegens von Klimadaten abseits von Niederschlag und Temperatur, werden zur Abschätzung der potenziellen Verdunstung häufig rein auf Temperaturinformationen basierende Ansätze verwendet.

Potenzielle Evapotranspiration

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts konzentrierten sich die Bemühungen zur Messung der Abnahme der Bodenfeuchte auf die Verdunstung und die der Messung der durch die Pflanzen benötigten Feuchtigkeit auf die Transpiration (HEIM 2002). Nach THORNTHWAITE (1931) hängen die Verdunstung und Transpiration – zusammen Evapotranspiration ETP – von der solaren Einstrahlung, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchte, der Vegetationsart und dem Bodenzustand ab, wobei die solare Einstrahlung der dominierende Faktor ist. Direkte Messungen der Solarstrahlung waren jedoch häufig nicht verfügbar. Daher näherte man die Menge des Wasserverlustes an die Atmosphäre durch Verdunstung über die mittlere Tagestemperatur, die geografische Breite und die Zeit im Jahr an, unter der Annahme einer ausreichenden Feuchteversorgung des Bodens für die Vegetation (HEIM 2002). Das entspricht dem Konzept der potenziellen Verdunstung. Zur Berechnung/Bestimmung der potenziellen Evapotranspiration gibt es vielfältige Ansätze, die grundsätzlich in drei Kategorien eingeteilt werden (STRZEPEK & YATES 1997): die hydrologischen oder Wasserbilanzmethoden, die analytischen Methoden basierend auf Klimavariablen und empirische Schätzer.

Die Differenz zwischen der aktuellen und der potenziellen Verdunstung hängt von der Verfügbarkeit von Feuchtigkeit im Boden ab. Solange die Bodenfeuchtigkeit ausreichend groß ist, entspricht die aktuelle Verdunstung der potenziellen Verdunstung, ansonsten ist sie kleiner.

Basierend auf dieser Grundlage entwickelte THORNTHWAITE (1931) den Niederschlagseffektivitätsindex, der sich auf die Summe der zwölf monatlichen Niederschlags-Effektivitäts-Verhältnisse bezieht. Das monatliche Niederschlags-Effektivitäts-Verhältnis bezieht sich auf den Monatsniederschlag geteilt durch die monatliche Verdunstung. Thornthwaite beschäftigte sich auch weiterhin mit der Entwicklung von Dürreindizes, jedoch sind seine Arbeiten zusammen mit denen Köppens eher als Grundstein der modernen Klimaklassifikation zu verstehen. Viele seiner Dürreindizes sind eher Ariditätsindizes denn Dürreindizes.

Zu der Kategorie von auf verschiedenen Klimadaten (zumeist P & T oder PET) basierenden Dürreindizes gehören z. B. der Trockenheitsindex nach DE MARTONNE (DE MARTONNE 1926), die Klimatische Wasserbilanz (KUHNKE (1936); THORNTHWAITE 1948), der Reconnaissance-Dürreindex (TSAKIRIS & VANGELIS 2005) und der Standardisierte Niederschlags-Evapotranspirations-Index (VICENTE-SERRANO et al. 2012a). Diese und weitere Indizes sind in Tabelle 2 beschrieben. Als ein Beispiel für einen neben Niederschlagsinformationen auch Temperaturdaten einbeziehenden Dürreindex wird im Folgenden der „Standardisierte Niederschlags-Evapotranspirations-Index“ SPEI näher vorgestellt, der eine Erweiterung des SPI-Konzeptes auf die Werte der Klimatischen Wasserbilanz ($P - ETP$) darstellt.

Standardisierter Niederschlags-Evapotranspirations-Index (SPEI; VICENTE-SERRANO et al. 2010a)

Der Hauptkritikpunkt am SPI ist nach VICENTE-SERRANO et al. (2012a), dass seine Berechnung nur auf Niederschlagsdaten beruht und damit weitere Variablen, welche das Ausmaß einer Dürre beeinflussen, nicht berücksichtigt. Der SPI beruht auf zwei Annahmen: 1. die Variabilität des Niederschlags ist viel höher als die anderer Klimavariablen wie Temperatur oder potenzielle Verdunstung (PET) und 2. die anderen Variablen sind stationär. Unter diesen Annahmen ist die Bedeutung anderer Variablen als dem Niederschlag vernachlässigbar und es wird angenommen, dass Dürre weitgehend durch die zeitliche Variabilität des Niederschlags bestimmt wird. In neueren Untersuchungen zum Einfluss von Dürren auf das Baumwachstum bzw. die Baumsterblichkeit (z. B. BARBER et al. 2000; MARTÍNEZ-VILLALTA et al. 2008; ALLEN et al. 2010; VICENTE-SERRANO et al. 2010c; CARNICER et al. 2011; CAMARERO et al. 2011; LINARES & CAMARERO 2011) und auf Wasserressourcen (CAI & COWAN 2008; LESPINAS et al. 2010; YULIANTI & BURN 1998; LIANG et al. 2010; YANG & LIU 2011) wurde jedoch die Bedeutung von wärmeinduziertem Trockenheitsstress aufgezeigt. Daher ist die Verwendung von Trockenheitsindizes, welche – wie der PDSI – Temperaturdaten in ihre Berechnung einbeziehen, der Verwendung von Indizes ohne Temperaturinformation vorzuziehen, wenn wärmegekoppelte Dürreauswirkungen auf verschiedene ökologische, hydrologische und landwirtschaftliche Systeme identifiziert werden sollen. Dem PDSI fehlt jedoch der mehrere Zeitskalen umfassende Ansatz, der für die Analyse von Dürre in Bezug auf verschiedene hydrologische Systeme bzw. die Differenzierung zwischen verschiedenen Dürretypen notwendig ist.

Der SPEI basiert auf der monatlichen Wasserbilanz (Niederschlag minus potenzielle Verdunstung), welche unter Nutzung einer dreiparametrischen log-logistischen Verteilung justiert wird. Die Werte werden unter Nutzung der gleichen Vorgehensweise wie für den SPI auf verschiedenen Zeitskalen akkumuliert und in Standardabweichungen bezogen auf Mittelwerte umgewandelt. Damit kombiniert er die Sensitivität des PDSI auf Veränderungen im Verdunstungsbedarf (die durch Temperaturfluktuationen und Trends verursacht wurden) mit der Einfachheit der Berechnung und der multitemporalen Natur des SPI. Der SPEI verwendet die gleiche Einteilung in die Feuchte- bzw. Dürrezustände, wie sie für den SPI in (Tabelle 1) angegeben ist.

3.4.6 Komplexere hydrometeorologische Indizes

Als Erweiterung zu den rein auf Klimainformationen (zumeist Temperatur und Niederschlag) basierenden Dürreindizes beziehen die komplexeren meteorologischen Dürreindizes auch Umgebungsinformationen wie Bodentyp, Bodenfeuchte, Topografie, Landnutzung usw. ein. Häufig werden die Indizes aus mehr oder weniger komplexen Wasserhaushaltsmodellen abgeleitet.

Besonders häufig angewendet und v. a. im 20. Jahrhundert (ab den 1970er-Jahren) als Referenzindex für Dürrevergleichsstudien herangezogen werden die verschiedenen Palmer-Indizes (PDSI: Anlage 1-22; mPDSI; scPDSI: Anlage 1-23; z-Index; CMI: Anlage 2-1; PDHI), die zum Teil auch den spezifischen landwirtschaftlichen (Z-Index und CMI) bzw. hydrologischen (PDHI) Dürreindizes zugeordnet werden. Weitere komplexere meteorologische Indizes sind der Prescott-Ratio Index (PRESCOTT 1948) und der Wasserbilanzindex (CLOPPET et al. 2011; Anlage 1-24). Beispielhaft wird Palmer's Dürreschwereindex kurz dargestellt und charakterisiert.

Palmer Dürreschwereindex (Palmer Drought [Severity] Index; Palmer; PDSI/PDI)

PALMER (1965) entwickelte einen Bodenfeuchtealgorithmus, der Niederschlags- und Temperaturdaten sowie den lokal verfügbaren Wassergehalt des Bodens nutzt. Die Berechnungen resultieren in einem Index (PDSI), der die standardisierten Feuchtebedingungen anzeigt und Vergleiche zwischen Lokalitäten und Monaten erlaubt. Der Index basiert auf einem Angebot-Bedarfs-Konzept der Wasserbilanzgleichung und berücksichtigt mehr als nur das Niederschlagsdefizit an bestimmten Orten.

Der Index bezieht sich auf Wetterbedingungen, die unnormal feucht oder trocken gewesen sind. Wenn die Bedingungen von trocken zu normal oder feucht wechseln, dann endet die durch den PDSI gemessene Dürre ohne den Abfluss, See- und Talsperrenspiegel oder andere hydrologische Langzeitauswirkungen in Betracht zu ziehen (KARL & KNIGHT 1985). Die aus länger anhaltenden Dürren resultierenden hydrologischen Auswirkungen werden demnach nicht richtig wiedergegeben (MCKEE et al. 1995).

Weitere Informationen zur Berechnung des PDSI, der Feuchteklasseneinteilung sowie seiner Vorzüge und Limitationen sind in Anlage 1-22 nachzulesen.

3.5 Landwirtschaftliche Dürreindizes

3.5.1 Motivation

Für den die Ernährungssicherheit der Menschheit bestimmenden Wirtschaftszweig Landwirtschaft spielen Dürren eine große Rolle. Trockenheit – im Sinne von Aridität – ist der weltweit größte limitierende Faktor für den landwirtschaftlichen Anbau und Ertrag. Doch auch die im Rahmen der natürlichen Klimavariabilität auftretenden Dürren – als zeitweise Trockenheit mit im Vergleich zum Normalen reduziertem Feuchtedargebot – haben weltweit große Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion, indem sie in bestimmten Jahren und Regionen zu Missernten und Ernteausschlägen führen. Damit ist die Landwirtschaft der erste ökonomische Sektor, der von den negativen Auswirkungen einer Dürre direkt betroffen ist. Dabei kann in direkte und indirekte Folgen von Trockenheit unterschieden werden. In direkter Folge einer Dürre werden Ernteerträge ebenso wie die Produktivität von Weideländern und Wäldern reduziert, die Brandgefahr steigt, die gespeicherte Wassermenge (in Böden, Flüssen, künstlichen Wasserspeichern, Grundwasser) sinkt, die Vitalität/Produktivität der Viehbestände (steigende Mortalität) wird eingeschränkt usw. (WILHITE 2000). Durch Dürren steigt zudem die Bodenerosion (zunächst Winderosion und beim „Wiederauftreten“ von [insb. intensiven] Niederschlägen Wassererosion) und durch die verminderte Vitalität der Pflanzen werden diese anfälliger für Pflanzenkrankheiten und Schädlinge. Insgesamt sind die indirekten Folgen von Dürre, zu denen auch reduzierte Einkommen der Bauern, geringere Steuereinnahmen und Migrationsbewegungen gehören, schwieriger zu quantifizieren.

Im landwirtschaftlichen Sinne beginnt eine Dürre nicht mit verringerten Niederschlagssummen, sondern, wenn die (im Boden) gespeicherten Wasservorräte die aktuelle Verdunstung nur zu einem Bruchteil der potenziellen Evapotranspirationsraten unterstützen (WMO 1992). Dabei hängt die Rate der Pflanzentranspiration stark von der durch das Wurzelsystem der Nutzpflanzen bestimmten Bodenwasserverfügbarkeit ab. Der in Dürresituationen auftretende Wassermangel wird oft durch eine höhere Hitzebelastung der Pflanzen verschlimmert, welche wiederum durch die erhöhte Einstrahlung bedingt durch geringere Wolkenbedeckung und wahrscheinlich geringere Albedo verursacht wird (SIVAKUMAR 2010). Die letztendlichen direkten Auswirkungen landwirtschaftlicher Dürren sind zudem abhängig von der Pflanzenart, deren Entwicklungsstand und dem Bodentyp (WMO 1975).

Daher sollte ein landwirtschaftlicher Trockenheitsindex idealerweise Informationen zur Vegetation, der Bodenart (Bodenfeuchtekapazität), der vorangegangenen Bodenfeuchte und der Evapotranspiration, die wiederum von der Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchte beeinflusst wird, integrieren (DÖRING 2010). Weil einige dieser Parameter nicht direkt messbar sind bzw. nur vereinzelt Messungen vorliegen (z. B. Bodenfeuchte, ETP), werden sie für die Erstellung von Dürreindizes nicht so oft eingesetzt. Zur Beschreibung von Trockenheit werden von vielen Dürreindizes letztlich Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Wassersättigungsdefizit oder andere direkt messbare Parameter herangezogen (LANDSBERG 1982; MESH-

CHERSKAYA & BLAZHEVICH 1997), was dann eher einem meteorologischen denn einem landwirtschaftlichen Dürreindex entspricht.

Die bisher vorgestellten meteorologischen Dürreindizes werden teilweise auch für landwirtschaftliche Anwendungen genutzt. Diese Indizes können die Wasserversorgung der Nutzpflanzen jedoch oft nur eingeschränkt beschreiben, weil sie zumeist die Bodenverhältnisse, welche den Bodenwasserhaushalt und das Bodenwasserspeichervermögen bestimmen, nicht oder nur sehr stark vereinfacht berücksichtigen. Zudem ist die Pflanzenart und deren Entwicklungszustand oft entscheidend für den Wasserbedarf (BUCHNER et al. 2006). Meteorologische Indizes betrachten zumeist nicht das Timing der Niederschläge, doch je nachdem, wann eine Dürre eintritt, sind die Auswirkungen (Schäden oder Verluste am Bestand) unterschiedlich stark ausgeprägt. Besonders sensible Phasen der Entwicklung sind die Keimung und das Hauptwachstum bzw. die Zeit vor der Ähren-/Früchteausbildung (DÖRING 2010), während eine in der Jugendentwicklung der Pflanze aufgetretene Trockenheit sich durch das gesteigerte Wurzelwachstum für die weitere Entwicklung (und v. a. während erneuter Trockenphasen) als positiv erweisen kann. Generell wird mit fortschreitendem Entwicklungsstadium der Pflanze aufgrund der abnehmenden Wachstumsplastizität von einer steigenden Sensitivität gegenüber Trockenheit ausgegangen (TAHIRO 2002).

Daher wurden im Laufe der Zeit eine Reihe von zum Teil pflanzen- und regionspezifischen Dürreindizes entwickelt, welche z. T. auch für die Steuerung des Bewässerungsmanagements in der Landwirtschaft genutzt werden. Eine solcher landwirtschaftlicher Dürreindex sollte verschiedene Parameter wie Niederschlag, Temperatur, Evapotranspiration, Abfluss und andere das Pflanzenwachstum beeinflussende Wasserversorgungsindikatoren einbeziehen und in eine einzige Zahl assimilieren, welche dann für operationale Entscheidungen im Landwirtschaftssektor ein umfassendes Bild liefert (SIVAKUMAR 2010). Analysen zur Verwendung landwirtschaftlicher Dürreindizes beinhalten SMITH & MCKEON (1998), STEPHENS (1998), ARENA et al. (2006), und YOO et al. (2006).

Zu den frühen zur Beschreibung landwirtschaftlicher Dürre genutzten Indizes, wie sie von der WMO (1975) zusammengestellt wurden, gehören:

- Methoden der potenziellen Evapotranspiration (WMO 1966)
- Methoden der aktuellen Evapotranspiration (BAIER & ROBERTSON 1966, BAIER 1967)
- Dürre für Frühlingsweizen(MACK & FERGUSON 1968 – Bodenwasserbilanzierungsalgorithmus)
- Dürre für Mais (BARGER & THOM 1949 – statistische Analyse der Ertrags und Niederschlagsdaten an sechs Stationen in Iowa)
- Feuchtigkeitsstresstag (DENMEAD & SHAW 1962 – Punkte des Turgor(Zellinnendruck)Verlustes von Mais als Funktion der Evapotranspiration bei Feldkapazität und Wurzelzonenfeuchtigkeit; DALE 1964; DALE & SHAW 1965; DALE 1968)
- Keetch-Byram Dürreindex (KEETCH & BYRAM 1968) – Dürre und Feuer in Vegetation
- Dürre in semiariden Weidegebieten (WHITE 1955)
- Palmer Dürre(schwere)index (PALMER 1965)

Einige dieser Indizes werden in den folgenden Kategorien landwirtschaftlicher Dürreindizes noch genauer betrachtet (z. B. Feuchtigkeitsstresstag und Keetch-Byram Dürreindex) bzw. wurden schon bei den meteorologischen Dürreindizes (Potenzielle Evapotranspiration, Palmer Index) vorgestellt. Entsprechend des allgemeinen Berechnungsansatzes bzw. der Eingangsgrößen der Indizes werden drei Unterkategorien landwirtschaftlicher Dürreindizes unterschieden. Zunächst werden überwiegend auf meteorologischen Eingangsdaten beruhende Indizes (Abschnitt 3.5.2) betrachtet, die sich zum Teil gar nicht so stark von den im Kapitel 3.4 vorgestellten meteorologischen Dürreindizes unterscheiden. Zum Teil werden zusätzlich zu den meteorologischen Eingangsdaten noch pflanzenartenspezifische Koeffizienten einbezogen (z. B. YMI) oder auf Bo-

den(feuchte)informationen zurückgegriffen (z. B. Feuchtigkeitsstresstag, Z-Index, CMI, Cy). Eine Vielzahl der landwirtschaftlichen Dürreindizes basiert auf Wasserbilanzüberlegungen (Abschnitt 3.5.3) oder versucht direkt, die für das Pflanzenwachstum entscheidende Bodenfeuchte (Abschnitt 3.5.4) zu beschreiben.

Die folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die verschiedenen landwirtschaftlichen Dürreindizes in den beschriebenen drei Kategorien.

Tabelle 4: Übersicht über landwirtschaftliche Dürreindizes

Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/Weitergehende Informationen
Überwiegend auf meteorologischen Eingangsdaten beruhende Ansätze							
1	Feuchtigkeitsstresstag <i>Moisture stress day</i>		DENMEAD & SHAW (1962) Ein Feuchtigkeitsstresstag (z.B. Verlust des Zellinnendrucks beim Mais) tritt auf, wenn: ■ ETP > 6,4 mm/d mit Bodenwasser unterhalb von 85 % der nFK oder ■ ETP > 5,1 mm/d mit Bodenwasser unterhalb von 50 % der nFK ■ ETP > 1,3 mm/d mit Bodenwasser unterhalb von 10 % der nFK	ETP, FK	t	■ Vitalität von Nutzpflanzen bewerten	
2	Hitze-Niederschlags-Verhältnis <i>heat/precipitation ratio</i>	HPR	GAGE & MUKERJI (1977) ■ für den Monat m wird der HRP berechnet aus der Tagesgradzahlsumme (MDD _m) und dem Monatsniederschlag (P _m) $HPR = \frac{MDD_m}{1 + P_m}$ ■ Berechnung der Tagesgradzahlsumme nach der Einzeldreiecksmethode (nach SNYDER 2002) $MDD_m = n \left[\frac{(T_x - T_L)^2}{24} + (T_n - T_L) \right] \quad \text{falls } T_L < T_n$ $MDD_m = n \frac{(T_x - T_L)^2}{24} \quad \text{falls } T_L \geq T_n$ T _x /T _n [°C] = monatliche Mittelwerte der Max./Min.temperatur T _L = Temperaturschwelle (= 10°C für Mais); n = Zahl der Tage pro Monat	T, P, T _x , T _n	t	■ Ursprünglich entwickelt für die Interpretation dürreinduzierten Stresses in Insektenpopulationen (GAGE & MUKERJI 1977) und später auf Mais angewendet (GAGE 2003)	■ hohe HPR-Werte zeigen in Kombination mit geringen Niederschlagssummen auftretende Hitzeakkumulationen
3	Ulanova's Index	Cy	GATHARA et al. (2002) ■ Der Index berechnet sich aus der Summe der mittleren Lufttemperaturen für Mai und Juni (T _{Mai-Juni}) und der Niederschlagssumme für die gleichen Monate (P _{Mai-Juni}) sowie Informationen zur Bodenfeuchte: $C_y = \frac{0,01 \cdot \sum T_{\text{Mai-Juni}}}{W_a \cdot \sum P_{\text{Mai-Juni}}}$ W _a [mm] = nutzbarer Bodenfeuchtigkeitsvorrat in 1 m Tiefe, wenn die mittleren Frühlingstemperaturen 5°C überschreiten	T, P, BF	t	■ Typischer Dürrestressindex für Nutzpflanzen	
4	Mediterraner Getreidedürreindex <i>Mediterranean crop drought index</i>	MCDI	DIODATO & BELLOCCHI (2008) ■ Einbeziehung von Informationen zu den Zeiträumen vor der Wachstums-saison, um die Effekte auf den Ertrag besser wiedergegeben zu können $MCDI = \frac{MDD_m}{0,55p_{m-1} + p_m + 30}$	T, P, T _x , T _n	t	■ Gute Korrelation (R ² = 0.65) zwischen dem MCDI und der Maisernte (DIODATO & BELLOCCHI 2008)	■ Verwendung der gleichen Berechnungsmethode für MDD _m , wie für den HPR dargestellt
5	Klimafeuchtezahl nach Müller	KFZ	MÜLLER ET AL. (2008) $KFZ = \log \left(\frac{N \sqrt{nFK}}{1 + \Delta e} + 1 \right)$ N [mm] = Niederschlagssumme im Betrachtungszeitraum nFK [%] = nutzbare Feldkapazität der oberen 100 cm des Bodens Δe [hPa] = Mittel des Mittagwertes des Sättigungsdefizits der Luft im Betrachtungszeitraum	P, e, nFK			Klassifizierung: ■ KFZ < 1,75: arid ■ 1,76 bis 2,25: semiarid ■ 2,26 bis 2,5: neutral ■ 2,51 bis 2,75: semihumid ■ KFZ > 2,75: humid
6	Standardisierter Defizit Index <i>Standardized deficit index</i>	SDI	VERGNI & TODISCO (2010) ■ Basiert auf dem gleichen Ansatz wie der SPI – anstelle des Niederschlags wird jedoch die kumulierte Differenz (<i>cumulated difference</i> , CDI) zwischen der Referenz-Evapotranspiration und dem Niederschlag für einen gegebenen Monat und eine gewählte Zeitskala verwendet ■ Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des CDI wird gut durch die Allgemeine Extremwertverteilung (GEV) angenähert	P, ETP	m+	■ Langzeittendenzen der landwirtschaftlichen Bilanz zwischen Wasserversorgung und –bedarf analysieren	■ von der Größe her gleiche (jedoch vom Vorzeichen her entgegen gesetzte) Kategorien der Feuchtigkeitsanomalien wie der SPI

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, T_x – maximale Lufttemperatur, T_n – minimale Lufttemperatur, ETP – potenzielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z. B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m - monatlich

	Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen
Auf Wasserbilanzüberlegungen beruhende Indizes								
7	(Klimatologisches) Wasserdefizit	(C)WD	STEPHENSON (1998)	WD = ETP – AET	ETP, AET		■ Dürrestress für Böden und Pflanzen; Schätzer des Wasserbedarfs für die Beregnung	
8	Relativer Wasserdefizit-Index	RWDI	SIVAKUMAR et al. (2011)	$RWDI = (1 - AET / ETP) 100$ Berechnung für die Gesamt AET und ETP für den Betrachtungszeitraum	ETP, AET			
9	Akkumuliertes Wasserdefizit	AWD	SIVAKUMAR et al. (2011)	■ Akkumulation des Wasserdefizites (WD) zumeist über eine Wachstumsperiode hinweg	ETP, AET		■ mit Ernteverlusten korreliert	
10	Palmer's Feuchteanomalienindex	Z-Index	PALMER (1965)	■ Zwischenterm in der Berechnung des PDSI ■ Feuchteanomalie des gegenwärtigen Monats ohne Berücksichtigung der vorangegangenen Bedingungen	P, T, ETP, Q, BF/AWC	m	■ Detektion von Kurzzeitdürren ■ Verfolgen landwirtschaftlicher Dürren (schnelle Reaktion auf Veränderungen in den Bodenfeuchtwerten)	■ kann auch ungewöhnlich nasse bzw. trockene Monate in einer ausgedehnten Trocken- bzw. Nassperiode identifizieren ■ zur Beschreibung und Quantifizierung landwirtschaftlicher Dürre dem gebräuchlicheren CMI vorzuziehen (KARL 1986).
11	Nutzpflanzen Feuchte Index <i>Crop moisture index</i>	CMI	PALMER (1968)	■ aus Prozeduren der Berechnung des PDSI entwickelt ■ aus Evapotranspirationsdefiziten anstelle von Niederschlagsdefiziten berechnet ■ betrachtet das Feuchtigkeitsdefizit in den obersten 5 ft. der Bodensäule (BYUN & WILHITE 1999; NARASIMHAN & SRINIVASAN 2005)	P, T, ETP, Q, BF/AWC	w, m	■ kurzfristige landwirtschaftliche Dürrebedingungen überwachen, welche das Getreidewachstum beeinflussen ■ CMI misst landwirtschaftliche Dürren am effektivsten während der warmen Jahreszeit (spricht der Wachstumssaison; HEIM 2002).	■ Anlage 2-1 ■ beginnt und endet jede Wachstumssaison nahe Null → nicht für Monitoring der Feuchtebedingungen außerhalb der allgemeinen Wachstumsperiode geeignet, z.B. wenn die Saatkeimung einsetzt (v.a. wenn sich Dürreperioden über mehrere Jahre hinziehen; HAYES 2000) ■ z.T. unplausible Reaktion auf einen Anstieg in der potentiellen Evapotranspiration (Anstieg der CMI-Werte; MISHRA & SINGH 2010)
12	Ertrags-Feuchtigkeitsindex <i>Yield moisture index</i>	YMI	CEAS (1979)	■ auf gewichteten monatl. kumulativen Niederschlagssummen basierend: $YMI = \sum_i^n P_i K_i$ i = Entwicklungsstadium des Getreides (1 = Anpflanzen/Verpflanzen, 2 = vegetative Phase, 3 = Blüte und Reproduktionsphase, 4 = Reifestadium, 5 = Ernte), n = Gesamtzahl der Entwicklungsstadien Pi [mm] = Niederschlag während des i-ten Entwicklungsstadiums Ki = entsprechender Getreidekoeffizient für das i-te Entwicklungsstadium.	P, kc	m	■ getreidespezifisch	■ Anlage 2-2
13	Wasserbilanzindex <i>Water Balance Index</i> auch <i>FAO Water (Requirements) Satisfaction Index</i>	WBI/ WRSI	FRERE & POPOV (1979)	■ Niederschläge im Verhältnis zum Wasserbedarf WRSI = AET / WR ■ Dabei repräsentiert AET die aktuelle Wassermenge, die aus dem Bodenreservoir entnommen wird. ■ Schätzung des Wasserbedarfs WR aus der Multiplikation von Pflanzenkoeffizienten (nach DOORENBOS & PRUITT 1977 bzw. FAO 1998) mit der potentiellen Verdunstung.	P, PET, kc, BI	d	■ spiegelt den Grad wieder, zu dem die Wasserbedürfnisse einjähriger Nutzpflanzen während der Wachstumsperiode erfüllt werden ■ Indikator der Leistung des Getreides basierend auf der Wasserverfügbarkeit während der Wachstumssaison	■ Methode entwickelt für die Verwendung in Entwicklungsländern mit regenwassergespeister Landwirtschaft (SAKAMOTO et al. 1984).
14	Agro-Hydro Potential	AHP	PETRASOVITS (1990)	■ AHP = AET / ETP(optimal) ■ Die berechneten Werte werden je nach Größe in vier verschiedene Kategorien eingeteilt (siehe Tabelle 32 in Anlage 2-5)	ETP, AET	t	■ zeigt an, zu welchem Grad und wie lange ein bestimmtes Gebiet den Wasserbedarf gegebener Pflanzen decken kann.	■ Anlage 2-5 ■ Ernteeinbußen > 20 % möglich, wenn Index akzeptablen Bereich verlässt

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, TX – maximale Lufttemperatur, TN – minimale Lufttemperatur, ETP – potenzielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z. B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m - monatlich

	Dürreindex	Akro- nym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangs- daten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen
15	Pflanzen-Wasserstress Index <i>Crop Water Stress Index</i>	CWSI	RAO & SAX- TON (1995)	<ul style="list-style-type: none"> Verwendung eines dynamisches Boden-Pflanze-Atmosphären-Wasser Models zur Simulation von Bodenwassergehalten & Pflanzentranspiration basiert auf integrativen Tageswerten, die das pflanzenverfügbare Bodenwasser, Verdunstungsanforderung und die Empfindlichkeit der phänologischen Phasen der jeweiligen Pflanze berücksichtigen: $CWSI = \sum_{Anpfl.}^{Ernte} \left(1 - \frac{TP}{TP_p} \right) w$ <p>TP [mm/d] = berechnete aktuelle Transpiration TP_p [mm/d] = potentielle Transpiration w = saisonal abh. Wichtungsfaktor für die Korn-Ernte Empfindlichkeit</p>	P, T, BI, phänologi- sche Inf.	t		
16	Ariditätsanomalien-Index <i>Aridity Anomaly Index</i>	AAI	KUMAR & PANU (1997)	<ul style="list-style-type: none"> basiert auf der Wasserbilanzberechnung von THORNTHWAITE & MATHER (1955) zunächst Berechnung des Ariditätsindex AI: $AI = \frac{ETP - AET}{ETP} \times 100$ <ul style="list-style-type: none"> Anschließende Berechnung der Ariditätsanomalien AAI: $AAI = \frac{AI - \overline{AI}}{\overline{AI}} \times 100$	ETP, AET	t (?), w	<ul style="list-style-type: none"> vom Indian Meteorological Department benutzt direkte Beurteilung des Feuchtigkeitsstress wachsender Pflanzen 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 2-3 beschreibt die Verschiebung des Normalzustandes (in %) Wassersättigung des Bodens nicht berücksichtigt zeigt das Wasserverdefizit in einer Region an (Anforderungen einzelner Pflanzen sowie geographische Gegebenheiten nicht berücksichtigt)
17	Potentiell Verdunstungsdefizit <i>Potential Evaporation Deficit</i>	PED	PORTEOUS et al. (2005)	<ul style="list-style-type: none"> Akkumulation der Differenz zwischen potentieller (ETP) und aktueller (AET) Evaporation über eine Periode von t Monaten $PED_n = \sum_t PED_{n-1} + (ETP_n - AET_n)$	ETP, AET	M		<ul style="list-style-type: none"> ETP und AET werden durch ein Modell bestimmt
18	Evapotranspirationsdefizit-Index <i>Evapotranspiration deficit index</i>	ETDI	NARASIMAHAN & SRINIVASAN (2005)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung wöchentlicher Werte des Wasserstressverhältnisses (ETP - AET) / ETP für unterschiedliche Bodenschichten und -tiefen. 	ETP, AET	w	<ul style="list-style-type: none"> wöchentliche Werte spiegeln die kurzzeitigen Dürrebedingungen wieder, was während der Pflanzenwachstumsphasen hilfreich ist 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 2-9 Verwendung eines hochaufgelösten hydrologischen Modells (SWAT), das ein Pflanzenwachstumsmodell beinhaltet
19	Pflanzenspezifischer Dürreindex <i>Crop specific drought index</i>	CSDI	MEYER et al. (1993)	<ul style="list-style-type: none"> Nutzung eines einfachen Wasserbilanzmodells auf der räumlichen Skala von Ertragsberichtsbezirken; Einbeziehung der Wassernutzung während spezifischer Phasen des Getreidewachstums; schätzt die Bodenwasser- verfügbarkeit für unterschiedliche Zonen und Bodenschichten 	P, T, ETP, BI, phäno- logische Inf.	t	<ul style="list-style-type: none"> getreidespezifisch: für Mais (MEYER & PULLIMAN 1992; MEYER et al. 1993) und Soja (MEYER & HUBBARD 1995) 	
20	Pflanzenwachstumsindex <i>Plant Growth Index</i>	PGI	McDONALD, 1994	<ul style="list-style-type: none"> Akkumulation der Pflanzenwachstumsrate (Pgr), ab dem Zeitpunkt ab dem Pgr eine kritischen Schwelle (t) überschreiten: $PGI_n = \sum Pgr_n \text{ wobei } Pgr > t$		t		<ul style="list-style-type: none"> schätzt die Dauer der Weidewachstumsaison
21	Index zur Berechnung der an- gemessenen Feuchtigkeit für Pflanzen <i>Moisture Adequacy Index</i>	MAI	MCGUIRE & PALMER (1957)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung der Wasserbilanz (AET/ETP) Herstellung eines stufenweisen Bezugs der Wasserverfügbarkeit zu den verschiedenen Wachstumsstadien der Pflanzen. 	ETP, AET, phänologi- sche Inf.	w	<ul style="list-style-type: none"> in Indien zur Überwachung agrarwirtschaftlicher Dürren eingesetzt (KUMAR & PANU 1997; SASTRI et al. 1981; RAMANA RAO et al. 1981; SASTRI 1993) 	<ul style="list-style-type: none"> Möglichkeit gezielterer Maßnahmen zur Anpassung, da sich das Fehlen von Wasser in den einzelnen Phasen unterschiedlich stark auswirkt
22	Regionaler Landwirtschaft Dürre Index <i>Regional agricultural drought index</i>	DTX	MARLETTO et al. (2005); MATERA et al. (2007)	<ul style="list-style-type: none"> basiert auf den täglichen Transpirationsdefiziten (berechnet mit einem Wasserbilanzmodell) beschreibt das über eine Periode von x Tagen integrierte Transpirationsdefizit einer Ackerpflanze 	P, T, BI, Kc, phänologi- sche Inf.	t		<ul style="list-style-type: none"> Vorteile gegenüber SPI liegen in der Einbeziehung von Effekten der Landnutzung, der Böden sowie der die Pflanzentranspiration steuernden Klimabedingungen Verwendung des Bodenwasserbilanzmodells CRITERIA (ZINONI & MARLETTO 2003)

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, TX – maximale Lufttemperatur, TN – minimale Lufttemperatur, ETP – potenzielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z. B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m - monatlich

Dürreindex	Akro- nym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangs- daten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen
Indizes zur Bewertung der Bodenfeuchte							
22	Relative-Bodenfeuchte-Index <i>Relative Soil Moisture index</i>	RSM- index	THORNTHWAITE & MATHER (1955) ■ verschiedene Definitionsansätze: Beziehung zwischen der Bodenwasserspeicherung (<i>Soil Water Storage SWS</i>) und der Bodenwasserspeicherkapazität (<i>Soil Water Holding Capacity SWHC</i> ; SIVAKUMAR et al. 2011). $RSM_a = \frac{SWS}{SWHC} \times 100\%$ ■ Vom Chinesischen meteorologischen Dienst (<i>Chinese Meteorological Administration CMA</i>) wird die relative Bodenfeuchte RSM _b definiert als Verhältnis zwischen der Bodenfeuchte in Prozent BF und der Feldkapazität des Bodens F _k (SIVAKUMAR et al. 2011) $RSM_b = \frac{BF}{F_k} \times 100\%$	P, PET, BF, BI, phäol. Inf. & Managementpraktiken	t	■ Pflanzengesundheit und landwirtschaftliches Dürremonitoring; ■ messen/ simulieren, wie viel Wasser für das Getreide im Boden vorhanden ist	■ Anlage 2-7 ■ Indizes der relativen Bodenfeuchte sind sehr sensitiv gegenüber der Getreideart und dem Pflanzenmanagement während der verschiedenen Wachstumsphasen.
23	Bodenfeuchteanomalien-Index <i>Soil Moisture Anomaly Index</i>	SMAI	BERGMAN et al. (1988) ■ Der Ansatz stützt sich inhärent auf die Feuchtigkeitsbilanzierungsmethode von Thornthwaite und verwendet ein 2-Schichten-Bodenmodell zur Verfolgung der Bewegung des Wassers. Er liefert eine fortlaufende Bewertung der prozentualen Bodensättigung.	BF	t	■ Dürren auf globaler Basis charakterisieren	■ SMAI-Werte ändern sich mit einer Geschwindigkeit, die zwischen dem schnellen CMI und dem relativ langsamen PDSI liegt.
24	Bodenfeuchte Dürre Index <i>Soil moisture drought index</i>	SMDI	HOLLINGER et al. (1993) ■ Aufsummieren der täglichen Bodenfeuchte über ein Jahr	BF	t		■
25	Bodenfeuchtedefizit-Index <i>Soil Moisture Deficit Index</i>	SMDI	NARASIMHAN & SRINIVASAN (2005) ■ Der Index wird aus der wöchentlichen Bodenfeuchte, die durch eine Langzeitstatistik normalisiert wurde, erzeugt. ■ Zunächst Bestimmung des Bodenfeuchtedefizits (SDM; in %) bestimmt ■ dann wird die wöchentliche Dürreschwere SDMI _j bestimmt über die Akkumulation der Trockenheitswerte $SMDI_j = 0,5 \cdot \left(SMDI_{j-1} + \frac{SDM_j}{50} \right)$	BF	t, w	■ Korrelation von SMDI und ETDI für die geringeren Bodentiefen zu den kurzzeitigen SPI (1-3 Monate) ■ SMDI für tiefere Bodenschichten stimmt besser mit dem langsamer reagierenden PDSI sowie dem SPI für 6-12 Monate überein	■ Anlage 2-8 ■ NARASIMHAN & SRINIVASAN (2005) verwendeten das hydrologische Modell SWAT mit der vereinfachten Version des EPIC-Getreidemodells ■ vergleichbare Dürrekategorien wie der PDSI
26	Bodenfeuchtigkeitsindex <i>Soil moisture index</i>	SMI	HUNT et al. (2009) ■ basiert auf dem aktuellen Wassergehalt, der Feldkapazität und dem Welkepunkt	P, ETP, BI, phäol. Inf. & Managementpraktiken			
27	Bodenwasserindex <i>Soil Water Index</i>	SWI	z.B. CLOPPET (2011) ■ Menge an in der Wurzelzone gespeichertem Bodenwasser SW _i als Prozentsatz der Wasserhaltekapazität (WHC) des Bodens am Ende eines bestimmten Tages i $SWI = SW_i / WHC \times 100 \%$ ■ Ableitung des Bodenwassergehaltes durch eine einfache Massenbilanzgleichung: $SW_i = SW_{i-1} + P_i - AET$	P, AET, WHC		■ Für auf Bodenfeuchtebedingungen basierende Planungen (z.B. zusätzliche Bewässerung) ■ Keine Informationen zum über die Jahreszeit integrierten Zustand der Nutzpflanzen	■ Anlage 2-10 ■ Simulation von AET und SW mit einem Modell ■ CLOPPET (2011) nutzte das hydrometeorologische Modell SAFRAN ISBA MODCOU ■ SENAY (2009) nutzt Model VegET (SENAY 2008)

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, TX – maximale Lufttemperatur, TN – minimale Lufttemperatur, ETP – potentielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z. B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m - monatlich

3.5.2 Überwiegend auf meteorologischen Eingangsdaten beruhende Ansätze

Meteorologische Daten sind in den meisten Fällen die Grundvoraussetzung für die Bewertung von Dürre in der Landwirtschaft und sei es, um – beispielsweise unter Nutzung eines allgemeinen hydrologischen oder spezifischeren Bodenwasserhaushaltsmodells – weitere für die Landwirtschaft relevante Parameter abzuleiten. In den letzten Jahren wurden auch verstärkt Fernerkundungsdaten für das landwirtschaftliche Dürremonitoring verwendet, jedoch entfalten diese Daten zumeist erst in Kombination mit direkten Messdaten ihren vollen Nutzen. Eine Reihe der schon in Kapitel 3.4 genannten meteorologischen Dürreindizes werden teilweise auch zur Beobachtung und Bewertung landwirtschaftlicher Dürren genutzt (z. B. HTC, HDSI, PDSI, SPI) und zum Teil auch direkt als landwirtschaftliche Dürreindizes klassifiziert. Weitere überwiegend auf meteorologischen Eingangsdaten beruhende landwirtschaftliche Dürreindizes, die zumeist in einer einfachen Form auch Boden- oder Pflanzeninformationen einbeziehen, sind (Details siehe Tabelle 4):

- Feuchtigkeitsstresstag (*Moisture stress day*; DENMEAD & SHAW 1962)
- Palmers Feuchteanomalienindex (Z-index; PALMER 1965)
- Nutzpflanzen Feuchte Index (*Crop moisture index*, CMI; PALMER 1968)
- Ertrags-Feuchtigkeitsindex (*Yield moisture index*, YMI; CEAS 1979)
- Hitze-Niederschlags-Verhältnis (*heat/precipitation ratio*, HPR; GAGE & MUKERJI 1977)
- Ulanova's Index (Cy; GATHARA et al. 2002)
- Standardisierter Defizit Index (*Standardized deficit index*, SDI; VERGNI & TODISCO 2010)
- Mediterraner Nutzpflanzendürreindex (*Mediterranean crop drought index*, MCDI; DIODATO & BELLOCCHI 2008)

3.5.3 Auf Wasserbilanzüberlegungen beruhende Indizes

Viele der agrarwissenschaftlichen Dürreindizes beruhen auf allgemeinen Wasserhaushaltsmodellen bzw. spezifischen Modellierungen des Bodenwasserhaushalts. Das Wasserdefizit (WD; auch klimatologisches Wasserdefizit CWD; STEPHENSON [1998]) ist ein Output der klimatologischen Wasserbilanz, wie sie aus dem Wasserhaushaltsmodell nach THORNTHWAITE & MATHER (1955) bestimmt wird. Es bezeichnet die Differenz zwischen der potenziellen (*ETP*) und der aktuellen (*AET*) Evapotranspiration: $WD = ETP - ATP$

Das (klimatologische) Wasserdefizit integriert die kombinierten Effekte von solarer Einstrahlung, Evapotranspiration und Lufttemperatur auf die Bedingungen in einem Einzugsgebiet, wie sie durch die vom Niederschlag abgeleitete verfügbare Bodenfeuchte gegeben sind. Man kann sich das Wasserdefizit vorstellen als die Menge an Wasser, die von den gegebenen Böden unter dem vorliegenden Temperaturantrieb zusätzlich verdunstet oder transpiriert worden wäre. Damit ist diese Größe ein Schätzer für den Dürrestress auf Böden und Pflanzen. Man kann sich das klimatische Wasserdefizit auch als Schätzer des Wasserbedarfs für die Berechnung vorstellen. Die Größe des Wasserdefizits für gegebene Bedingungen hängt von der für die Wasserbilanz angenommenen Bodenwasserspeicherfähigkeit ab. Diese liegt zwischen 50 und 150 mm für ein 1 m Bodenprofil.

Zur Schätzung der aktuellen Evapotranspiration existieren verschiedene Methoden, die jedoch hier nicht näher vorgestellt werden sollen. BENDER & SCHALLER (2014) beschreiben zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration eines Boden-Pflanze-Atmosphäre-Systems folgende Ansätze:

- Verfahren nach PENMAN-MONTHEITH (MONTHEITH 1965) – eine der ausgereiftesten Methoden mit weitverbreiteter Anwendung (ALLEN 1986)
- FAO-Gras-Referenzverdunstung für eine kurz dichte Grasdecke mit 0,12 m Wuchshöhe und ausreichender Wasserversorgung; Ableitung der Evapotranspiration von Landflächen mit davon abweichender Vegetation

mittels Vegetationskoeffizienten – die von ALLEN et al. (1994) beschriebene Gras-Referenzverdunstung basiert auf der Penman-Montheith-Beziehung

- Methode nach RENGER & WESSOLEK (1990) – speziell für ebene Standorte und Böden auf Lockergestein
- Verfahren nach WENDLING (WENDLING et al. 1984) – für agrarmeteorologische Beratungen entwickelt

Die aktuelle Evapotranspiration wird auch mittels hydrologischer Modelle ermittelt oder aus Fernerkundungsdaten abgeleitet. Indizes, welche die aktuelle Evapotranspiration der potenziellen/optimalen Evapotranspiration gegenüberstellen und somit sich aufbauende Wasserdefizite für die Vegetation bewerten, sind (Details siehe Tabelle 4):

- Wasserbilanzindex (Water Balance Index WBI; auch FAO Water satisfaction index; FRERE & POPOV 1979)
- Agro-Hydro Potential (AHP, PETRASOVITS 1990)
- Pflanzenspezifischer Dürre Index (Crop specific drought index, CSDI; MEYER et al. 1993) – für Mais (MEYER et al. 1993) und Soja (MEYER & HUBBARD 1995)
- Ariditätsanomalien-Index (Aridity Anomaly Index, AAI; KUMAR & PANU 1997)
- Relatives Wasserdefizit-Index (RWDI) und akkumuliertes Wasserdefizit (AWD; SIVAKUMAR et al. 2011)
- Potentielles Verdunstungsdefizit (Potential Evaporation Deficit, PED; PORTEOUS et al. 2005)
- Evapotranspirationsdefizit-Index (Evapotranspiration deficit index, ETDI; NARASIMAHAN & SRINIVASAN 2005)
- Regionaler Landwirtschaft Dürre Index (Regional agricultural drought index, DTx; MARLETTO et al. 2005)

3.5.4 Indizes zur Beschreibung der Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte ist eine der wichtigsten Variablen in hydrologischen, klimatologischen, biologischen und ökologischen Prozessen, weil sie eine entscheidende Rolle bei den Interaktionen zwischen Atmosphäre und Landoberfläche spielt. Generell ist die Menge an verfügbarer Bodenfeuchtigkeit in der Wurzelzone ein kritischerer Faktor für das Pflanzenwachstum als die Größe des aktuell vorliegenden Niederschlagsdefizites oder -überschusses. Sie hat einen starken Einfluss auf die Erträge, so geben beispielsweise HANE & PUMPHREY (1984) an, dass ein 10 %-iges Wasserdefizit während der Befruchtungsphase von Mais den Ertrag um 25 % reduzieren kann. Daher bietet es sich an, die Bodenfeuchte und aus der Bodenfeuchte abgeleitete Indizes für das Monitoring von Dürrezuständen zu verwenden.

Wie viel Wasser von den Böden gehalten werden kann, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Die wichtigsten sind Bodentextur, -struktur und Gehalt an organischer Materie (Humus). Dabei wirkt die organische Materie wie ein Kleber, der das Gerüst aus Bodenpartikeln und Poren zusammenhält und auch eine interne künstliche Bodenstruktur aufbauen kann, die den leichten Eintritt des Wassers in den Boden und seine Speicherung in pflanzenverfügbarer Form ermöglicht. Im Boden wird das Wasser in den Poren (Grob-, Mittel- und Feinporen) und direkt um die Bodenpartikel und die organische Materie herum (Haftwasser) mit einem unterschiedlichen Potenzial gehalten.

Man spricht von gesättigtem Boden, wenn der Boden kein weiteres Potenzial mehr hat, Wasser aufzunehmen. Das Maximum an Wasser, das ein Boden aufnehmen kann, wird dabei von seiner Porosität bestimmt. Durch die Gravitation sickert das Wasser schnell in tiefere Schichten, bis der Boden nach 2-3 Tagen den Feldkapazität (FK) genannten Feuchtigkeitsgehalt erreicht hat. Der (permanente) Welkepunkt (WP) kennzeichnet den Austrocknungsgrad des Bodens. Am Welkepunkt können die Pflanzen nicht mehr genügend Saugspannung aufbauen, um das noch im Boden vorhandene Wasser herauszuziehen. Durch den Abriss des Wasserstroms tritt Luft in die Leitungsbahnen der Pflanze ein und diese beginnt zu welken. Die Wassermenge, die ein Boden in pflanzenverfügbarer Form zwischen der Feldkapazität und dem Welkepunkt halten kann (Available water content, AWC = FK – WP), hängt von der Korngrößenverteilung und dem Humusgehalt des Bodens ab.

Entsprechend der gemessenen oder modellierten Bodenfeuchte kann die in Tabelle 5 beschriebene folgende Feuchte-Klassifikation vorgenommen werden (BÖTTCHER 2014a). Weiterhin werden die Auswirkungen geringerer Bodenfeuchtwerte von der Andauer ihres Auftretens bestimmt, wobei Perioden ab 5-10 Tagen ertragsrelevant sind. Des Weiteren spielt es eine große Rolle, wann – d. h. in welcher Phänophase – das Feuchtigkeitsdefizit auftritt. In der Regel ist die Hauptwachstumszeit des jeweiligen Getreides entscheidend. Etwas differenzierter sind die sensitiven Zeitabschnitte ausgewählter Nutzpflanzen in Tabelle 6 dargestellt. Entscheidend für den Ertrag ist jedoch nicht ausschließlich die ausreichende Feuchteversorgung der Pflanzen, sondern für einige temperatursensitive Arten auch die Temperatur. So ist z. B. der Weizen sehr empfindlich gegenüber hohen Temperaturen unmittelbar vor der Blüte – treten zu diesem Zeitpunkt sehr hohe Temperaturen auf, werden pro Ähre deutlich weniger Körner angelegt.

Tabelle 5: Klassifikation der Bodenfeuchte (BÖTTCHER 2014a)

Bodenfeuchte	Feuchteversorgung	Auswirkungen auf die Nutzpflanzen bzw. den Ertrag
50-80 % nFK	optimaler Bereich	Keine negativen Auswirkungen zu erwarten
30-50 % nFK	Unterversorgung	Kompensation durch die Pflanze möglich, solange nicht dauerhaft auftretend Ertrag kann noch im Normalbereich sein
< 30 %	Bodendürre	Keine vollständige Kompensation durch die Pflanze mehr möglich ertragsrelevanter Verlust tritt auf

Tabelle 6: Dürresensitive Zeitabschnitte ausgewählter Nutzpflanzen (BÖTTCHER 2014a)

Nutzpflanze	Beginn	Ende	Bemerkung
Sommer- & Wintergetreide	Ährenschieben	Gelbreife	Sommergetreide wird meist im März ausgesät, wo i.d.R. genügend Wasser zur Verfügung steht
Raps	Blüte	Vollreife	
Mais	Aussaat	Teigreife	
Zuckerrübe	Bestandesschluss		Ohnehin nur auf ‚guten‘ Böden, da auf gute Wasserversorgung angewiesen
Apfel	Ende Blüte	August	Juni oft entscheidend dafür, wie viele Nachkommen durchgebracht werden können

Die Bodenfeuchtigkeit bzw. die Änderung im Bodenwassergehalt (ΔS) wird bestimmt durch das Wasser, welches als Niederschlag auf den Boden trifft (P), die Evapotranspiration (ETP), ev. oberirdisch ab- bzw. zufließendes (R_{off}/R_{on}) oder in tiefere Bodenschichten infiltrierendes (I) Wasser:

$$\Delta S = P - ET - R_{off} + R_{on} - I$$

Weil die Infiltration schwierig zu bestimmen ist, wird oft vereinfachend eine Bodensäule betrachtet, die von der Oberfläche bis zu einer Tiefe reicht, in der signifikanter vertikaler Wasseraustausch stattfindet.

Die Bodenfeuchte innerhalb der Wachstumszone der Pflanzen kann durch verschiedenste Methoden gemessen werden; ein umfassendes internationales Netzwerk von Bodenfeuchtemonitoringinstrumenten existiert jedoch nicht. Stattdessen kann man sich mit der Berechnung der Bodenfeuchte durch numerische Modelle behelfen (KEYANTASH & DRACUP 2002). Diese bewerten den Wasserhaushalt der Bodensäule, unter Verwendung von Variablen wie Niederschlag, Temperatur, Bodentemperatur, Bodenporosität und Infiltration. Schwierig bleibt jedoch die Bewertung der Ergebnisse, wenn gemessene Vergleichswerte fehlen.

Die Schätzung von Bodenfeuchteanomalien ist von großer Relevanz für die Pflanzengesundheit und das landwirtschaftliche Dürremonitoring. Aufgrund begrenzter Bodenfeuchtemessungen ist der operationale Ein-

satz der Methode jedoch nicht immer praktisch umsetzbar. So wird in Australien die Bodenfeuchte und die pflanzenverfügbare Wasserhaltekapazität überwacht, jedoch eher auf regionaler als auf nationaler Ebene (SIVAKUMAR et al. 2011). In Europa werden die Karten der gegenwärtigen Bodenfeuchte auf europäischem Niveau mit dem EFAS-System modelliert. Die Werte können an jedem Standort mit dem langzeitlichen täglichen Mittelwert der Bodenfeuchte verglichen werden, was in einem normalisierten Bodenfeuchteprodukt resultiert.

Indizes der relativen Bodenfeuchte wurden entworfen, um zu messen und zu simulieren, wie viel Wasser für das Getreide im Boden vorhanden ist. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass Indizes, die nur auf dem Niederschlag basieren, den Wasserverbrauch und Wasserbedarf der Pflanzen nicht wiedergeben können (SIVAKUMAR et al. 2011). Auch wenn Bodenfeuchteindizes leicht anzuwenden und zu verstehen sind und auch rechenstechnisch wenig aufwendig sind, so haben sie doch gewisse Beschränkungen. So sind sie anfällig hinsichtlich der zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration verwendeten Methode. Auch die Schätzung der Bodenwasserhaltekapazität ist auf nationaler Ebene komplex (SIVAKUMAR et al. 2011).

Eine Vielzahl weiterer Indizes, welche auf die Bodenwasserverfügbarkeit für Getreide fokussieren, sind entwickelt worden. Viele Methoden berechnen zunächst das Bodenfeuchtigkeitsgleichgewicht mit 1-, 5-, 7- oder 10-Tagesschritten und danach ein integrierendes Maß (Index) zur Angabe des Grades, zu dem die Wasserbedürfnisse des Getreides erfüllt wurden. Sie wurden normalerweise für den Zweck des agrarmeteorologischen Getreidemonitoring und der Ertragsprognose entwickelt.

Auf Bodenfeuchteinformationen – gemessen oder modelliert – beruhende Dürreindizes sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

3.6 Hydrologische Dürreindizes

Aus der Sicht des gesamten Wasserkreislaufs werden hydrologisch orientierte Dürreindizes mit dem Ziel entwickelt, ein umfassendes Bild der Wasserbilanz in einem Einzugsgebiet für Zwecke des Wassermanagements zu erstellen (NIEMEYER 2008). Dabei wird insbesondere auch auf abflussgenerierende Aspekte wie Schneeakkumulation und -schmelze eingegangen, die jedoch nicht durch alle hydrologischen Dürreindizes adressiert werden (z. B. PHDI). Einen Überblick über hydrologische Dürreindizes geben z. B. TALLAKSEN & VAN LANEN (2004) oder SMAKHTIN (2001).

In der Flusshydrologie werden Dürren häufig auf Perioden mit geringen Abflüssen bezogen. Das internationale Glossar der Hydrologie (WMO 1974) definiert Niedrigwasser als den Abfluss von Wasser in einem Vorfluter während anhaltend trockenem Wetter. Diese Definition macht keinen klaren Unterschied zwischen Niedrigwasser und Dürren. Niedrigwasser sind ein saisonales Phänomen und eine integrierende Komponente des Abflussregimes eines jeden Vorfluters. Dürren enthalten Niedrigwasser-Perioden, aber ein alljährlich vorkommendes, saisonales Niedrigwasserereignis muss nicht notwendigerweise eine Dürre darstellen, auch wenn viele Forscher eine kontinuierliche Niedrigwasserperiode in einem Jahr als eine „jährliche Dürre bezeichnen (z. B. ZELENHASIC & SALVA, 1987; CLAUSEN & PEARSON 1995; TALLAKSEN et al. 1997).

Niedrigwasseranalysen können auf verschiedenste Bereiche fokussieren, wie z. B. die Häufigkeit von Abflussminima, der Geschwindigkeit des Abflussrückgangs bei ausbleibenden Niederschlägen, Abflussdauerkurven. Diese Analysen erlauben jedoch keine direkte Bestimmung des Starts und Endes von Trockenperioden. Im Dürre-Kontext ist die relevanteste hydrologische Analyse wahrscheinlich die Untersuchung fortgesetzter Perioden, während derer der Abfluss unter vorgegebenen Schwellen bleibt – die von YEVJEVICH (1967) vorge-

schlagene *theory of runs* („Theorie der Läufe“). Diese Perioden sind als „Spells“ oder „Runs“ bekannt (DRACUP et al. 1980; ZELENHASIC & SALVAI 1987; BONACCI 1993). Basierend auf dieser Theorie ist ein Dürreereignis definiert als Periode, während der eine hydrologische Variable unterhalb eines festgelegten Schwellenwertes liegt und die Schwere einer Dürre wird durch die kumulative Abweichung unterhalb des Schwellenwertes während der Dürreperiode bestimmt. Daher ist die Wahl des Schwellenwertes von entscheidender Bedeutung für die Definition hydrologischer Dürren. Der Schwellenwert kann basieren auf dem Mittelwert der Reihe (DRACUP et al. 1980), einem Perzentil (ZELENHASIC & SALVAI 1987) oder relativen Werten in Bezug auf den Mittelwert (CLAUSEN & PEARSON 1995). Die *run theory* erlaubt die Schätzung der Wiederkehrzeiten von Extremereignissen basierend auf einer ausgewählten Größe (z. B. kumulatives Defizit, Dauer oder mittlere Intensität; SEN 1976, 1977, 1980; DRACUP et al. 1980; FERNANDEZ & SALAS 1999; CHUNG & SALAS 2000; SHIAU & SHEN 2001; CANCELLIERE & SALAS 2004; GONZÁLEZ & VALDÉS 2006).

Aus der Perspektive des Wasserressourcenmanagements ist die Definition von Referenzabflussmengen und Indikatoren der Dürreintensität wichtig. Während diese Indikatoren normalerweise von Region zu Region variieren, können einige der Definitionen von Wasserknappheit als ein Anhaltspunkt dienen (DRACUP et al. 1980):

- starke Knappheit: jährlicher Abfluss ist um mindestens eine Standardabweichung geringer als der Mittelwert
- fortdauernde Knappheit: jährliche Abflussmengen sind über mindestens vier aufeinanderfolgende Jahre geringer als der Durchschnitt
- ausgedehnte Knappheit: starke oder fortdauernde Knappheit erstreckt sich über die gesamte betrachtete Region

Das OcCC (2000) schlägt vor, das Unterschreiten einer bestimmten Abflussmenge in den kleineren Mittellandflüssen als allgemeinen Trockenheitsindikator zu nutzen, weil diese Größe quantifizierbar ist und gleichzeitig auf die Landwirtschaft, die Trinkwasserversorgung, die Elektrizitätswirtschaft (leere Stauseen in den Voralpen) und den natürlichen Lebensraum (Fischsterben) auswirkt. Dieser Indikator ist zumindest im Schweizer Mittelland ein gutes Maß für die Trockenheit (CONEDERA 2003) und zeigt die Wasserbilanz eines ganzen Einzugsgebietes. Das betrachtete Fließgewässer darf jedoch nicht von einem See gespeist werden oder künstliche Zu- oder Anleitungen haben. Im Gebirge ist der Abfluss aufgrund des Abschmelzens von Schnee und Eis kein gutes Maß für die Trockenheit. Aus naturwissenschaftlicher Sicht erweist sich das NM7Q als nützliches Maß für die Trockenheit. Der Index bezeichnet den niedrigsten Abfluss während sieben aufeinanderfolgender Tage im Verlauf eines Kalenderjahres. Dabei handelt es sich um ein sensibles Maß für ausgeprägte Trockenheitsphasen, weil der identifizierte Zeitraum von sieben Tagen in eine längere Trockenzeit eingebettet sein muss, um kleine NM7Q-Werte zu erreichen (CONEDERA 2003).

Traditionell wird hydrologische Dürre durch das Gesamtwasserdefizit oder synonym die Dürreschwere S (*severity*; auch *run sum*) bewertet (KEYANTASH & DRACUP 2002). Die Schwere ist das Produkt (Abbildung 2) aus der Dauer D (auch *run length*), während der die Abflüsse konsistent unterhalb eines Schwellenwertes (z. B. dem hydroklimatischen Mittelwert) liegen und der Größe (*magnitude*) M (auch *run intensity*), welche die mittlere Abweichung des Abflusses vom Schwellenwert während der Dürreperiode bezeichnet (YEVJEVICH 1967; DRACUP et al. 1980). Nach dem Ende der Dürre wird das totale Wasserdefizit auf Null zurückgesetzt.

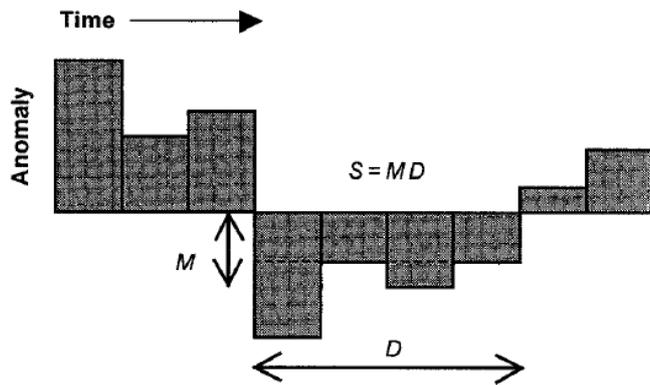


Abbildung 2: Illustration der Berechnung des Gesamtwasserdefizites S aus der Dürreandauer D und der Dürrestärke M (KEYANTASH & DRACUP 2002)

Bei der Analyse von Abflussdaten muss der Einfluss von (Aus)Baumaßnahmen an den Flussläufen berücksichtigt werden, welche die zeitlichen Charakteristika des Abflusses und die Abflussmengen stark beeinflussen können. Der Ansatz des Gesamtwasserdefizites summiert die zeitlich integrierten Abflussbedingungen an einem bestimmten Punkt eines gegebenen Flusses auf. Um jedoch eine repräsentative Bewertung der Dürrebedingungen für eine große Fläche zu erhalten, sind abgestimmte Untersuchungen in verschiedenen Wassereinzugsgebieten der Region notwendig (KEYANTASH & DRACUP 2002). Weil die Dürre nicht in allen Teileinzugsgebieten gleich stark ausgeprägt sein muss, gehen durch die Generalisierung einer Region basierend auf dem Hauptstrom die Details verloren. Zudem können große Flüsse auch die Klimainformation anderer Regionen hineinbringen.

Eine kumulative Abweichung des Abflusses von den mittleren Bedingungen kann Langzeittendenzen in der Wasserverfügbarkeit anzeigen (KEYANTASH & DRACUP 2002). Analog zu den kumulativen Niederschlagsanomalien (CPD) werden die Dürrephasen durch Bereiche des steilen Abfalls der kumulativen Abflussanomalien angezeigt und nicht durch Werte unterhalb der Nulllinie. Die absolute Größe der kumulativen Anomalien hängt sehr stark vom Startzeitpunkt der Analyse ab, wo der Indexwert auf null gesetzt wird (unabhängig von den tatsächlich vorliegenden Abflussbedingungen).

Tabelle 7 gibt einen Überblick über eine Auswahl an hydrologischen Dürreindizes.

Tabelle 7: Übersicht über ausgewählte hydrologische Dürreindizes

Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/Weitergehende Informationen	
Auf meteorologischen Daten und Wasserhaushaltsmodellierungen beruhende Indizes								
1	Palmer hydrologischer Dürreindex <i>Palmer Hydrological Drought Index</i>	PHDI	PALMER (1965), KARL (1986)	<ul style="list-style-type: none"> modifizierte Version des Palmer-Index; PHDI wird vom PDSI abgeleitet, um den Langzeiteinfluss von hydrologischen Dürren zu quantifizieren Die Werte des PHDI tendieren dazu auch einige Monate nachdem der PDSI auf Normalniveau zurückgekehrt ist, negativ zu bleiben 	P, T, ETP, Q, BF/AWC	m	<ul style="list-style-type: none"> Monitoring der Wasserversorgung Maß von länger andauernden hydrologischen Dürren 	<ul style="list-style-type: none"> gewöhnlich nähert er sich dem Normalzustand allmählicher an als der PDSI (KARL et al. 1987)
2	Oberflächenwasserversorgungsindex <i>Surface Water Supply Index</i>	SWSI	SHAFER & DEZMAN (1982)	<ul style="list-style-type: none"> Entwickelt als Antwort auf die Limitationen des PDSI hinsichtlich der Gebirgsschneehydrologie Berechnet den gewichteten Mittelwert der standardisierten Anomalien von Niederschlag P, Speicherfüllung ReS, Schneedecke SD und Abfluss Q: $SWSI = (a P + b ReS + c SD + d Q - 50) / 12$ mit den Gewichtungsfaktoren $a + b + c + d = 1$ 	P, Q, SC, ReS	m	<ul style="list-style-type: none"> Verwendet für Flusseinzugsgebiete im Westen der USA, die aufgrund der Bedeutung der Schneedecke als Wasserspeicher durch den PHDI nicht gut wiedergegeben werden 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 3-1 Nicht für große Regionen mit signifikanter räumlicher hydrologischer Variabilität geeignet, da die verwendeten Gewichte von einem Teil der Region zum anderen variieren können (z.B. DOESKEN et al. 1991)
3	Rückgewinnungs-Dürre-Index <i>Reclamation Drought Index</i>	RDI	WEGHORST (1996)	<ul style="list-style-type: none"> Ähnlich zum SWSI Berücksichtigt auch den temperaturabhängigen Bedarf und Dauer Auf Einzugsgebietsebene berechnet 	P, T, Q, SC, ReS	m	<ul style="list-style-type: none"> in Oklahoma als Teil des Dürreplans verwendet 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 3-2 Vergleichbarkeit unterschiedlicher Einzugsgebiete ist aufgrund der Einzigartigkeit des Indexes für jedes Einzugsgebiet eingeschränkt
4	Grundwasserressourcen-Index <i>Groundwater Resource Index</i>	GRI	MENDICINO et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> Verwendet ein einfaches Wasserbilanzmodell Berücksichtigt die geo-lithologischen Bedingungen, welche die sommerliche hydrologische Antwort auf Winterniederschläge bestimmen 		t	<ul style="list-style-type: none"> Fokus auf Grundwasserressourcen 	
5	Water Balance Derived Drought Index		VASILIADES et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Simulation des Abflusses unter Nutzung eines Wasserbilanzmodells Ableitung des Index durch Normalisierung und Standardisierung der synthetischen Abflüsse mit dem Mittelwert 		t	<ul style="list-style-type: none"> Für Gebiete ohne Pegeldata oder Gebiete mit Datenknappheit 	<ul style="list-style-type: none"> Verwendung des UTHBAL Wasserbilanzmodells (LOUKAS et al. 2007) Letztendlicher Index entspricht dem Ansatz von SDI oder SSI
Auf Abflussdaten beruhende Indizes								
6	Gesamtwasserdefizit			<ul style="list-style-type: none"> Als Indikator der Dürreschwere (DRACUP et al. 1980; YEVJEVICH 1967) $S = D M$ D: Dauer (auch <i>run length</i>), während der die Abflüsse konsistent unterhalb eines Schwellenwertes (z.B. dem hydroklimatischen Mittelwert) liegen M: Ausmaß (<i>magnitude</i>; auch <i>run intensity</i>); bezeichnet die mittlere Abweichung des Abflusses vom Schwellenwert während der Dürreperiode Nach Dürreende wird das totale Wasserdefizit auf Null zurückgesetzt. 	Q	t, m		<ul style="list-style-type: none"> Berücksichtigung des Einflusses von (Aus-)Baumaßnahmen an den Flussläufen notwendig
7	Kumulative Abflussanomalien			<ul style="list-style-type: none"> Analoges Konzept zu den kumulativen Niederschlagsanomalien CPD (Tabelle 2) 	Q	t, m	<ul style="list-style-type: none"> Zeigen Langzeittendenzen im Abflussgeschehen an 	<ul style="list-style-type: none"> Dürrephasen werden durch Bereiche des steilen Abfalls der kumulativen Abflussanomalien angezeigt
8	Regionaler Abflussdefizitindex <i>Regional Streamflow Deficiency Index</i>	RSDI	STAHL (2001)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung eines Defizitindex basierend auf der Abflusszeitreihe unter Berücksichtigung des aus den Abfluss-Dauer-Kurven abgeleiteten 90 % Überschreitungsschwellenwertes (Vergleich zu historischen [Mittel]werten) Verwendung des Index zur Identifikation homogener Regionen (beinhalten mehrere Niedrigwasseraufzeichnende Stationen) mittels Clusteranalyse RSDI wird für jede homogene Region berechnet 	Q	t	<ul style="list-style-type: none"> Angewendet z.B. in Frankreich (PRUDHOMME & SAUQUET 2007) und für eine Vielzahl europäischer Regionen (HANNAFORD et al. 2011) 	
9	Regionaler Dürregebiet Index <i>Regional drought area Index</i>	RDAI	FLEIG ET AL. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Basierend auf der Methodik des RSDI Bestimmung des Anteils der von Dürre betroffenen Fläche $A_{Dürre}$ der betrachteten Region (A_{Region}) $RDAI = A_{Dürre} / A_{Region}$ Auftreten einer regionalen Dürre, wenn $RDAI > 0,7$, d.h. 70 % der Region sind von Dürre betroffen 	Q	t	<ul style="list-style-type: none"> basierend auf Abflusswerten und Wetterlagen 	

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, TX – maximale Lufttemperatur, TN – minimale Lufttemperatur, ETP – potentielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z. B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m - monatlich

	Dürreindex	Akro- nym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangs- daten	Zeitliche Auflösung	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen
10	Dürrehäufigkeitsindex <i>Drought Frequency Index</i>	DFI	GONZÁLEZ & VALDÉS (2006)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Basiert auf der Häufigkeitsverteilung extrem persistenter Abweichungen ■ Wahrscheinlichkeitsfunktion berücksichtigt die Persistenz und nutzt sie als Kriterium für die Häufigkeitsanalyse ■ Nutzt die mittlere Wiederkehrhäufigkeit als Skala für die Bewertung der Dürrebedeutung 	variabel	t		<ul style="list-style-type: none"> ■ DFI kann auf jede hydroklimatische Variable, die von Dürre betroffen wird, angewendet und als Dürreindikator verwendet werden
11	Abflussdürreindex <i>Streamflow Drought Index</i>	SDI	NALBANTIS (2008)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berechnung des kumulativen Abflusses V aus dem Abflussvolumen Q $V_i = \sum Q_i$ für das i-te hydrologische Jahr ■ Ermittlung des SDI aus den V_i $SDI_i = \frac{V_i - \bar{V}}{\sigma}$ ■ Oder Verwendung einer Verteilungsfunktion (zur Berechnung von y_i) und Überführung der Daten in eine Normalverteilung $SDI_i = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} \rightarrow \text{ähnliches Konzept wie SPI}$ 	Q	t		<ul style="list-style-type: none"> ■ Anlage 3-3 ■ Prinzipiell entspricht das Konzept dem des nachfolgenden SRI bzw. SSI
12	Standardisierter Abflussindex <i>Standardized Runoff Index SRI</i> <i>Standardized Streamflow Index</i>	SRI/ SSI	SHUKLA & WOOD (2008)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Basierend auf dem Konzept des SPI 	Q	m+		<ul style="list-style-type: none"> ■ VICENTE-SERRANO et al. (2012b) testeten verschiedene Verteilungen und Anpassungsmethoden

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T – mittlere Lufttemperatur, TX – maximale Lufttemperatur, TN – minimale Lufttemperatur, ETP – potentielle Evapotranspiration, AET – aktuelle Evapotranspiration, e – Sättigungsdefizit der Luft, Q – Abfluss, GW – Informationen zum Grundwasser, BF – Bodenfeuchte, FK – Feldkapazität des Bodens, AWC – verfügbarer Wassergehalt des Bodens, BI – Bodeninformationen, allgemein (z. B. Bodenart, Wasserspeichervermögen), LU – Informationen zum Bewuchs bzw. der Landnutzung, kc – pflanzenspezifische Koeffizienten. Abkürzungen der zeitlichen Auflösung: t – täglich, w – wöchentlich, d – dekadisch (10 Tage), m – monatlich

3.7 Auf Fernerkundungsdaten basierende Indizes

Die Entwicklung von Erdbeobachtungssatelliten seit den 1980er-Jahren eröffnete neue Möglichkeiten der Entdeckung und des Monitorings von Dürre (NIEMEYER 2008). In den letzten Jahrzehnten wurden diese satellitenbasierten Vegetationsindizes, welche das Potenzial haben, Anomalien wie Dürren zu entdecken, verstärkt verwendet. Vegetationsindizes sind mathematische Transformationen der Daten eines oder mehrerer spektraler Bänder, die dazu entworfen wurden, den allgemeinen Gesundheitszustand der Vegetation anzuzeigen, während der Einfluss von nicht an die Vegetation gebundenen Faktoren, wie den atmosphärischen Bedingungen (Wasserdampf, Aerosole), dem Bodenhintergrund und den variierenden Einfallswinkeln des Sensors und der Sonnenbestrahlung minimiert wird (SIVAKUMAR et al. 2011).

Globale Imager, wie NOAA's *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), der neuere *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) der NASA und der *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) der europäischen Raumfahrtagentur (ESA) liefern multispektrale Bilder, die für die Ableitung verschiedener Vegetationsindizes zur Unterstützung des Dürremonitorings geeignet sind. Diese Instrumente sammeln nahezu täglich räumlich kontinuierliche spektrale Messungen der Erdoberfläche. Die Vegetationsindizes basieren auf dem grundlegenden Verständnis darüber wie elektromagnetische Strahlung in den verschiedenen Spektralregionen mit der Vegetation interagiert (z. B. Absorption, Reflexion) und den spezifischen biophysikalischen Eigenschaften der Pflanzen, welche die spektrale Antwort kontrollieren.

Die meisten frühen Vegetationsindizes nutzen die Spektralbereiche des sichtbaren roten und des nahen infraroten (NIR) Lichtes, welche auf Veränderungen im Chlorophyllgehalt bzw. der internen Blattstruktur reagieren. Mit der Einführung neuer Fernerkundungsinstrumente (z. B. *Landsat Thematic Mapper* TM und AVHRR) mit zusätzlichen Spektralbändern wurden neue Vegetationsindizes entwickelt, die auch kurzwellige (oder mittlere) Infrarot (SWIR) und Thermaldaten nutzen und für die Ableitung von Landoberflächentemperaturschätzern (LST) genutzt werden (NIEMEYER 2008). Diese sind sensitiv gegenüber dem Pflanzenwassergehalt bzw. der Verdunstung.

Für Dürreanwendungen wurden und werden die negativen Korrelationen zwischen auf dem sichtbaren oder nahe infrarotem Licht basierenden Vegetationsindizes (zumeist *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) und der Helligkeit oder Landoberflächentemperaturen untersucht und in neue Indizes übersetzt (z. B. CARLSON et al. 1994, MORAN et al. 1994, MCVICAR & BIERWIRTH 2001, BAYARJARGAL et al. 2006).

Einen guten Überblick über die erste Generation des auf Fernerkundungsdaten basierenden Dürremonitorings wird von GUTMAN (1990) gegeben. KOGAN (1997) gibt einige Jahre später ein Update und in den letzten zehn Jahren fassen verschiedene Reviews die alten und neu entwickelten Indizes zusammen (z. B. BAYARJARGAL et al. 2006, NIEMEYER 2008, SIVAKUMAR et al. 2011, ZARGAR et al. 2011). Trotz der Vielzahl von v. a. in den letzten Jahren neu entwickelten Indizes werden nur recht wenige operational für das landwirtschaftliche Dürremonitoring eingesetzt (SIVAKUMAR et al. 2011). In diesem Abschnitt bzw. in Tabelle 8 werden einige der gebräuchlichsten Indizes kurz vorgestellt. Die Auflistung der aus Satellitendaten abgeleiteten Dürreindizes ließe sich noch stark ergänzen. Allein ZARGAR et al. (2011) beschreiben 40 auf Fernerkundungsdaten basierende Dürre- und Vegetationsindizes.

NIEMEYER (2008) stellt in seinem Review weitere aus Satellitendaten abgeleitete Indizes vor. So nutzte CARLSON et al. (1994) den Neigungsgrad der Beziehung zwischen Landoberflächentemperaturschätzer (LST) und NDVI. MORAN et al. (1994) erstellte den so genannten Vegetationsindex/Temperaturtrapezoid (VITT) als eine Erweiterung des Getreide-Wasserstressindex (CSWI; JACKSON et al. 1981), der in seiner ursprünglichen Form

keine Fernerkundungsdaten einbezog. Der von WAN et al. (2004) entwickelte *Vegetation Temperature Condition Index* VTCI bezieht sich auf das Verhältnis der LST-Differenzen zwischen Pixeln mit einem gegebenen NDVI-Wert in ausreichend großen Gebieten. Der *Temperature Vegetation Dryness Index* TVDI (SANDHOLT et al. 2002) basiert auf einer empirischen Beziehung zwischen LST und NDVI. Kritisch ist bei diesen beiden Indizes die Bestimmung der „warmen und kalten Ecken“ sowie der „trockenen und nassen Ecken“ der LST/NDVI-Räume, da die Normalisierung der LST/NDVI-Beziehung stark von den im Kalibrationszeitraum beobachteten Extremen abhängt. GHULAM et al. (2007a, b) versuchten, die Beziehung zwischen dem NDVI und der Breitband-Albedo anstelle der LST auszunutzen und wendeten ihre Methoden auf Daten an, die von Sensoren des *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) und des *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) abgeleitet wurden. GHULAM et al. (2007a) schlugen den *Vegetation Condition Albedo Drought Index* (VCDAI) vor, beschrieben jedoch einige erhebliche Probleme hinsichtlich der Menge und Vielfalt an Inputdaten, welche zur Definition des gesamten NDVI/Albedo Spektralraumes für Trocken und Nassperioden sowie für dicht und kaum bewachsene Oberflächen notwendig sind. GHULAM et al. (2007b) führten den *Perpendicular Drought Index* (PDI) ein, der von den atmosphärisch korrigierten Reflexionsgraden im NIR und roten Band sowie einer senkrechten geometrischen Konstruktion auf den Reflexionsräumen der beiden Bänder abgeleitet wird. Der PDI wurde durch GHULAM et al. (2007c) zum *Modified Perpendicular Drought Index* (MPDI) verbessert, indem der Anteil der Vegetation eines Pixel, welcher die Bodenfeuchte und das Vegetationswachstum ausmacht, einbezogen wird. Dadurch ist der MPDI auf bewachsenen Oberflächen dem PDI überlegen (GHULAM et al. 2007c).

Mit der Entwicklung neuer Sensoren geht auch die Entwicklung neuer Dürreindizes weiter, welche versuchen, die durch die Multi-Bänder gebotenen Möglichkeiten auszuschöpfen. Dazu gehört beispielsweise der von WANG & QU (2007)vorgeschlagene *Normalized Multi-Band Drought Index* (NMDI). Der NMDI basiert auf einem NIR und zwei SWIR Kanälen und nutzt den Neigungswinkel zwischen den beiden wassersensitiven Absorptionsbändern 6 und 7 von MODIS. Damit stellt der NMDI eine Verbesserung des *Normalized Difference Water Index* (NDWI; GAO 1996) dar, welcher auf zwei Bändern (je eins im NIR und SWIR) basierte.

LIU et al. (2008) verfolgten einen anderen Ansatz zur Konstruktion eines Dürreindex aus Fernerkundungsdaten. Sie schlugen einen auf einer linearen Kombination von drei Wolkenindizes basierenden *Remote Sensing Drought Risk Index* (RDRI) vor. Die Wolkenindizes beschreiben die Länge von kontinuierlicher Wolkenabwesenheit als Maß für die niederschlagsfreie Zeit, das Verhältnis zwischen bewölkten und nicht bewölkten Tagen und die Länge der längsten kontinuierlichen Wolkendecke. Sie wendeten die Methode auf Daten des Chinesischen operationellen meteorologischen FY-2c Satelliten an und konnten für China einen größeren Anteil an Dürren richtig identifizieren als mittels des von MODIS-Daten abgeleiteten *Vegetation Condition Index* (VCI; KOGAN 1990, 1995b).

Tabelle 8: Übersicht über eine Auswahl an auf Fernerkundungsdaten basierenden Dürreindizes

Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen	
„Frühe“ auf Satellitendaten basierende Trockenheitsindizes							
1	Normalisierte Differenz Vegetationsindex <i>Normalised Difference Vegetation Index</i>	NDVI	ROUSE et al. (1974), TUCKER (1979)	<ul style="list-style-type: none"> NDVI = $(NIR - R) / (NIR + R)$ NIR: Spektrale Reflexion im nahen Infraroten R: Spektrale Reflexion im sichtbaren roten Bereich unter gesunden Bedingungen absorbiert das Chlorophyll das Licht und reflektiert weniger R → höhere NDVI-Werte 	NOAA/AVHRR; NIR, SWIR	<ul style="list-style-type: none"> extensiv als Grundindex für eine Vielzahl an Fernerkundungsindizes zur Messung des Vegetationszustandes genutzt 	<ul style="list-style-type: none"> NDVI ist sensitiv gegenüber dunkem und nassem Hintergrund (HUETE et al. 1985) wie viele andere Verhältnis-basierte standardisierte VI Probleme mit Skalierung und Nicht-linearitäten Sättigung möglich, wenn viel Biomasse vorhanden ist atmosphärische Interferenzen (Wolken, Rauch, Aerosole, etc.) können Pixel "kontaminieren"
2	<i>Crop Water Stress Index</i>	CWSI	IdSO et al. (1981); JACKSON et al. (1981)	<ul style="list-style-type: none"> $CWSI = 1 - AET/ETP$ (JACKSON et al. 1981) Ersatz der ursprünglichen Terme durch die aus Fernerkundungsdaten abgeleitete Differenz zwischen der Kronen- und der Lufttemperatur 	LST	<ul style="list-style-type: none"> verwendet für die Planung von Bewässerungsmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> MORAN et al. (1994) nannte den Index <i>Vegetationsindex / Temperaturtrapezoid</i> (VITT)
3	<i>Normalized Difference Infrared Index</i>	NDII	HARDISKY et al. (1983)	<ul style="list-style-type: none"> $NDII = R850 - R1650 / (R850 + R1650)$ R850: Spektrale Reflexion des NIR-Kanals R1650: Spektrale Reflexion bei 1650 nm 	NOAA/AVHRR; NIR, R1650	<ul style="list-style-type: none"> NDII ist hoch korreliert mit dem Kronen und Blattwassergehalt; 	
4	Vegetationszustandsindex <i>Vegetation Condition Index</i>	VCI	KOGAN (1990)	<ul style="list-style-type: none"> bestimmt die Abweichung des derzeitigen NDVI vom minimalen NDVI in Bezug auf den Langzeit-NDVI VCI für den Woche/Monat j wird berechnet aus $VCI_j = NDVI_j - NDVI_{min} / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \times 100$ $NDVI_{max} / NDVI_{min}$ = Maximale und minimale NDVI-Werte in der Reihe für die spezifische Woche/Monat 	NOAA/AVHRR; NDVI	<ul style="list-style-type: none"> Misst die Gesundheit der Vegetation bewertet die Effekte des sich ändernden Wetters auf die NDVI-Signale im US-DM verwendet 	<ul style="list-style-type: none"> Schwerpunkt auf das Beobachten 'saisonaler Trockenheit' anstelle des Rankings ausgedehnter Dürren
5	Monatlicher VCI <i>Monthly VCI</i>	MVCI	McVICAR & JUPP (1998)	<ul style="list-style-type: none"> räumliche Perspektive auf die Abweichungen von den Langzeitsignalen 	NOAA/AVHRR	<ul style="list-style-type: none"> Gewicht auf das Ranking von Monaten oder Jahreszeiten verschiedener Jahre 	<ul style="list-style-type: none"> beschränkt auf vergleichbare Monate oder Jahreszeiten (z.B. all Auguste) in der historischen Zeitreihe
6	<i>Temperature Condition Index</i>	TCI	KOGAN (1995b)	<ul style="list-style-type: none"> Modifikation des VCI zur Nutzung der Strahlungstemperatur (<i>brightness temperature</i> BT) anstelle des NDVI als Input Berechnet aus der Abweichung des Monats vom Maximum in der Zeitreihe Berechnung für Monat j: $TCI_j = BT_{max} - BT_j / (BT_{max} - BT_{min}) \times 100$ 	NOAA AVHRR; BT	<ul style="list-style-type: none"> ansteigen der Blatttemperaturen mit Feuchtigkeitsstress der Pflanzen Idee: je höher die Temperatur desto höher die Dürre 	
7	<i>Vegetation Health Index (VHI)</i>	VHI	KOGAN (1995b)	<ul style="list-style-type: none"> Kombiniert VCI und TCI verwendet einen Gewichtungsfaktor für den Beitrag von VCI und TCI $VHI = aVCI + (1-a)TCI$ 	NOAA AVHRR; VCI, TCI	<ul style="list-style-type: none"> effektiver als andere Vegetationsindizes (KOGAN 1990, 2001) 	<ul style="list-style-type: none"> wenn keine Informationen vorliegen wird a = 0,5 verwendet
8	<i>Normalized Difference Water Index</i>	NDWI	GAO (1996)	<ul style="list-style-type: none"> komplementär zum NDVI: $NDWI = NIR - SWIR / (NIR + SWIR)$ 	NOAA/AVHRR NIR, SWIR		
„Jüngere“ auf Satellitendaten basierende Trockenheitsindizes							
9	<i>Enhanced Vegetation Index</i>	EVI	HUETE et al. (2002)	<ul style="list-style-type: none"> Optimierter Index, entwickelt zur Verstärkung des Vegetationssignals Verbessertes Vegetationsmonitoring durch eine Entkopplung vom Kronenraumhintergrundsignal und eine Reduktion atmosphärischer Einflüsse $EVI = G (NIR - RED) / (NIR + a RED - b Blue + L)$ NIR/RED/Blue = Spektrale Reflexionen in den entsprechenden Bereichen L = Kronenhintergrundanpassung a & b = Koeffizienten des Aerosolwiderstandterms (Nutzung des blauen Bandes für die Korrektur der Aerosoleinflüsse im roten Band) G = Verstärkungsfaktor (<i>gain factor</i>) 	MODIS, NIR, RED, Blue	<ul style="list-style-type: none"> verbessertes Monitoring weniger atmosphärische Einflüsse Verbesserte Sensitivität in Regionen mit viel Biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> limitierter Datensatz (im Jahr 2000 eher als wissenschaftlicher denn als operationaler Sensor gestartet) im MODIS-EVI Algorithmus verwendete Koeffizienten: L=1, a=6, b=7,5 und G=2,5.

Hinweise: BT: Strahlungstemperatur (brightness temperature), LST: Landoberflächentemperatur (Landsurface temperature), MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, NOAA/AVHRR: NOAA's Advanced Very High Resolution Radiometer, NIR: nahes Infrarot, SWIR: kurzwelliges Infrarot

Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten	(originaler) Anwendungszweck/ identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/ Weitergehende Informationen	
„Jüngere“ auf Satellitendaten basierende Trockenheitsindizes							
10	<i>Normalised difference temperature index</i>	NDTI	MCVICAR & JUPP (2002)	<ul style="list-style-type: none"> Kombination von AVHRR-Daten mit meteorologischen Daten Index erlaubt Einblick in die regionale Bodenwasserbilanz (aktuelle im Verhältnis zur potentiellen Evapotranspiration) unter Nutzung der thermalen und reflektiven Eigenschaften 	P, T, NOAA AVHRR	<ul style="list-style-type: none"> Bezug zum Crop Water Stress Index (spezifische Tageszeitversion des CSWI) 	<ul style="list-style-type: none"> Link zur regionalen Wasserbilanzmodellierung, die nicht die räumliche Interpolation täglicher Niederschlagsdaten benötigt
11	<i>Temperature Vegetation Dryness Index</i>	TVDI	SANDHOLT et al. (2002)	<ul style="list-style-type: none"> basiert auf einer empirischen Beziehung zwischen LST und NDVI $NVDI = LST - LST_{min} / (a + bNDVI - LST_{min})$ mit LST_{min} = minimale Oberflächentemperatur in dem Dreiecksraumkonzept LST / NDVI LST = beobachtete Oberflächentemperatur des Pixels a und b sind Parameter die die trockene Ecke definieren und aus der linearen Anpassung für LST_{max} abgeleitet werden LST_{max}: maximale Oberflächentemperatur = $a + bNDVI$ 	MODIS (LST, NDVI)	<ul style="list-style-type: none"> Bewertet den Bodenfeuchtezustand 	<ul style="list-style-type: none"> Kritisch ist bei diesen beiden Indizes die Bestimmung der „warmen und kalten Ecken“ sowie der „trockenen und nassen Ecken“ der LST/NDVI-Räume, da die Normalisierung der LST/NDVI-Beziehung stark von den im Kalibrationszeitraum beobachteten Extremen abhängt
12	<i>Vegetation Temperature Condition Index</i>	VTCl	WAN et al. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> Verhältnis der LST-Differenzen zwischen Pixeln mit einem gegebenen NDVI-Wert in ausreichend großen Gebieten $VTCl = LST_{max} - LST / (LST_{max} - LST_{min})$ VTCl ist geringer für Dürre und größer für nasse Bedingungen 	MODIS (LST, NDVI)	<ul style="list-style-type: none"> Nahezu Echtzeit-Monitoringansatz 	
13	<i>Perpendicular Drought Index</i>	PDI	GHULAM et al. (2007b)	<ul style="list-style-type: none"> von den atmosphärisch korrigierten Reflexionsgraden im NIR und roten Band sowie einer senkrechten geometrischen Konstruktion auf den Reflexionsräumen der beiden Bänder abgeleitet 	NIR, R	<ul style="list-style-type: none"> fehlende Genauigkeit auf Oberflächen zwischen unbedecktem Boden und dicht bewachsenen landwirtschaftlichen Feldern 	
14	<i>Modified Perpendicular Drought Index</i>	MPDI	GHULAM et al. (2007c)	<ul style="list-style-type: none"> Anteil der Vegetation eines Pixel, welcher die Bodenfeuchte und das Vegetationswachstum ausmacht, wird mit einbezogen 	NIR, R	<ul style="list-style-type: none"> für unbedeckten Boden gleiche Performance wie PDI für nichtflache Topographie mit variablen Bodenarten und Ökosystemen funktioniert der MPDI besser als der PDI 	
15	<i>Vegetation Condition Albedo Drought Index</i>	VCDAl	GHULAM et al. (2007a)	<ul style="list-style-type: none"> Versuch die Beziehung zwischen dem NDVI und der Breitband-Albedo anstelle der LST auszunutzen 	NDVI, LST	<ul style="list-style-type: none"> erhebliche Probleme hinsichtlich der Menge und Vielfalt an Inputdaten, welche zur Definition des gesamten NDVI/Albedo Spektralraumes für Trocken und Nassperioden sowie für dicht und kaum bewachsene Oberflächen notwendig sind 	
16	<i>Normalized Multi-Band Drought Index</i>	NMDI	WANG & QU (2007)	<ul style="list-style-type: none"> basiert auf einem NIR und zwei SWIR Kanälen nutzt den Neigungswinkel zwischen den beiden wassersensitiven Absorptionsbändern 6 und 7 von MODIS extrahiert gleichzeitig Vegetations- und Bodenwassergehalt. 	MODIS Bänder 2 (NIR), 6, and 7 (SWIR)	<ul style="list-style-type: none"> Motivation: Verbesserung der Sensitivität des NDWI und NDII gegenüber der Dürreschwere 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Normalized Difference Water Index verbesserte Performance auf trockenen Böden und wenig bewachsenen Gebieten ähnliche Leistungsfähigkeit wie NWDI and NDII in dicht bewachsenen Gebieten.
17	<i>Remote Sensing Drought Risk Index</i>	RDRI	LIU et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> Index auf einer linearen Kombination von drei Wolkenindizes basierend Wolkenindizes beschreiben die Länge von kontinuierlicher Wolkenabwesenheit als Maß für die niederschlagsfreie Zeit, das Verhältnis zwischen bewölkten und nichtbewölkten Tagen und die Länge der längsten kontinuierlichen Wolkendecke. 	FY-2c	<ul style="list-style-type: none"> Anwendung der Methode auf Daten des Chinesischen operationellen meteorologischen FY-2c Satelliten → für China größerer Anteil an Dürren richtig identifiziert als mittels des von VCI 	
18	<i>Evaporative stress index</i>	ESI	ANDERSON et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Repräsentiert zeitliche Anomalien im Verhältnis von aktueller (AET) und potentieller (ETP) Evapotranspiration ESI = standardisierte Anomalien von AET/ETP AET und ETP sind momentane Schätzer kurz vor der Mittagszeit, die aus dem LST-basierten Oberflächenenergiebilanzmodell ALEXI (<i>Atmosphere-Land Exchange Inverse</i>; ANDERSON et al. 1997; ANDERSON et al. 2007a,b; MECIKALSKI et al. 1999) abgeleitet werden 	LST	<ul style="list-style-type: none"> Verhältnis AET/ETP in der Landwirtschaft als Werkzeug für die Detektion von Getreidestress und die Bewässerungsplanung (MORAN 2003) 	

Hinweise: BT: Strahlungstemperatur (*brightness temperature*), LST: Landoberflächentemperatur (*Landsurface temperature*), MODIS: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, NOAA/AVHRR: NOAA's *Advanced Very High Resolution Radiometer*, NIR: nahes Infrarot, SWIR: kurzwelliges Infrarot

3.8 Kombinierte Indizes

Im Allgemeinen wird die Dürrebewertung anhand individueller Indizes vorgenommen, die entweder auf meteorologischen Daten oder auf Fernerkundungsbildern beruhen. In den letzten Jahren wurde die Kombination von Dürreindizes als Mittel zur besseren Informationsausbeute vorhandener, praxiserprobter Indizes diskutiert (KALLIS 2008; NIEMEYER 2008; SIVAKUMAR et al. 2011). Die Entwicklung von kombinierten Indizes, die hydrometeorologische und Fernerkundungs-Indizes einbeziehen, kann dazu beitragen, Fehlauflösungen (wenn z. B. die Biomasserreduktion aus anderen Gründen als dürreinduziertem Trockenheitsstress geschieht) zu reduzieren. Auch die Kombination verschiedener hydrometeorologischer Indikatoren, welche zum Teil unterschiedliche Zeitskalen abdecken, kann dazu beitragen, ein detailliertes Bild des tatsächlichen Dürrezustandes und der damit verbundenen sektorspezifischen Auswirkungen zu erhalten.

Dürrepläne basieren daher in der Regel auf multiplen Indizes. Bei der Kombination der Indizes zur Aufstellung von Dürreplänen unterscheidet man grundsätzlich zwischen quantitativen (Index, der die schwerwiegendsten Dürrebedingungen anzeigt; mindestens ein Index in einer bestimmten Kategorie; Mehrheit der Indikatoren) und qualitativen Methoden (Einberufen eines Dürrekomitees zur Festlegung, wann Reaktionen umzusetzen sind).

Eine Herausforderung bei den kombinierten Dürreindizes, wie sie v. a. von Dürremonitoringzentren (siehe Abschnitt 3.10) herausgegeben werden, ist häufig die Sicherstellung der Datenverfügbarkeit in nahezu Echtzeit. Zudem ist die Datenorganisation und -verarbeitung sehr umfangreich und herausfordernd ebenso wie die Gesamtberechnung des Index. Zum Teil werden in die Gesamtbewertung auch subjektive Experteneinschätzungen mit einbezogen (z. B. US Dürremonitor; Anlage 4-1).

Tabelle 9 gibt eine Übersicht über eine Auswahl an in den letzten Jahren verstärkt entwickelten kombinierten Dürreindizes.

Tabelle 9: Übersicht über kombinierte Dürreindizes

	Dürreindex	Akronym	Referenz	Kurzbeschreibung	Eingangsdaten/-indizes	(originaler) Anwendungszweck/identifizierte Dürreauswirkungen	Sonstiges/Weitergehende Informationen
1	US Dürremonitor <i>US drought monitor</i>	US-DM	SVOBODA et al. (2002)	<ul style="list-style-type: none"> Analyse verschiedener Schlüsselindizes zur Erstellung einer Gesamtkarte objektive Skalierung der Schlüsselparameter und Einordnung in fünf Dürrekategorien D0 (unnormal trocken) bis D4 (extreme Dürre) zusätzlich Informationen zum betroffenen Sektor (A: landwirtschaftliche Auswirkungen, W: hydrologische Auswirkungen, F: hohes Waldbrandrisiko) und zur Zeitskala (S – Kurzzeit: < 6 Mon.; L – Langzeit: > 6 Mon.) 	PDSI, CMI, PNI, BF, Q, VHI, (SWSI, KBDI, SPI, SC, ReS, GW, Ernteberichte)	<ul style="list-style-type: none"> integriertes Maß für die Dürrestärke auf verschiedenen Zeitskalen und die damit verbundenen Auswirkungen in verschiedenen Sektoren 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 4- 1; Manuelle Anpassung der endgültigen Karten, um die realen Bedingungen, wie sie von einer Vielzahl von Experten im ganzen Land berichtet werden, wieder zu spiegeln Versuch Dürre auf verschiedenen zeitlichen Skalen in einer Karte abzubilden ist schwierig
2	Nordamerikanischer Dürremonitor <i>North-American Drought Monitor</i>	NA-DM	LAWRIMORE et al. (2002)	<ul style="list-style-type: none"> Ausweitung des Konzeptes des US-Dürremonitors auf Nordamerika (Mexiko, USA & Kanada) Verwendung des gleichen Perzentilschemas für die Dürreindizes, jedoch unterschiedlicher Input an Indizes möglich, je nachdem welche Daten von den Partnern zeitnah bereitgestellt werden können und welche nationalen Indizes bevorzugt werden 	prinzipiell wie US-DM		<ul style="list-style-type: none"> Anlage 4-2
3	Aggregierter Dürreindex <i>Aggregate Drought Index</i>	ADI	KEYANTASH & DRACUP (2004)	<ul style="list-style-type: none"> multivariater aggregierter Index der sechs hydrologische Variablen einschließt (Niederschlag, Abfluss, Reservoirspeicher, Evapotranspiration, Bodenfeuchte und Wassergehalt des Schnees) Normalisierung der ersten Hauptkomponente (PC1) mit seiner Standardabweichung 	P, T, ETP, Q, BF, SC		
4	Vegetationsausblick <i>Vegetation Outlook</i>	VegOut	TADESSE & WARDLOW (2007)	<ul style="list-style-type: none"> verbindet Klimainformationen und Beobachtungen des gegenwärtigen Vegetationszustandes durch Fernerkundungsdaten mit ozeanischen Indexdaten und biophysikalischen Umweltinformationen wie Landnutzung, Bewässerungsstatus, Böden, Ökologie, um eine Ausblick über den zukünftigen allgemeinen Vegetationszustand zu 			
5	Sperling's Drought Index	SDI	Droughtscore.com (2007)	<ul style="list-style-type: none"> verwendet die Langzeitniederschlagsmuster, Grundwasserstände, Talsperrenfüllung und die Palmer-Indizes zur Charakterisierung von Dürre in langen Zeitfenstern Indexwert = 100: Normalbedingungen; > 120 extreme Dürre und < 80 extrem nass 	SPI, PDSI, z-Index, PDHI, CMI	<ul style="list-style-type: none"> Ziel: einfach zu verstehendes Maß des derzeitigen Dürrezustandes liefern indem auf die Langzeiteffekte von Wetterlagen geschaut wird 	<ul style="list-style-type: none"> SDI nicht zur Quantifizierung der Unterschiede in den Dürrezuständen verwenden (ein Ort mit einem SDI von 110 hat nicht 15 % mehr Dürre(risiko) als ein Ort mit einem SDI = 95) berechnet für alle Städte in den USA
6	Index der Vegetationsreaktion auf Dürre <i>Vegetation Drought Response Index</i>	VegRDI	BROWN et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> kombiniert die Indizes NDVI, SPI und PDSI bietet nahezu Echtzeit-Karten der Dürreschwere und der räumlichen Ausdehnung von Dürre mit 1 km räumlich feiner aufgelöst als der US-DM 	NDVI, SPI, PDSI	<ul style="list-style-type: none"> aufgrund der feinen räumlichen Auflösung besonders nützlich für lokale Planungen und Dürrereaktionsmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> Anlage 4-3 wird operationell für das Festland der USA berechnet
7	Hybrider Dürreindex <i>Hybrid Drought Index</i>	HDI	KARAMOUZ et al. (2009)	<ul style="list-style-type: none"> Kombination des SPI, SWSI and PDSI 	SPI, SWSI, PDSI	<ul style="list-style-type: none"> bessere Reaktion auf verschiedene Dürreauswirkungen als einfache Indizes 	
8	Kombinierter Dürreindex des EDO (<i>EDO's combined drought index</i>)	ECDI	SEPULCRE-CANTO et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> Integration von SPI, Bodenfeuchteanomalien und Fernerkundungsdaten (fAPAR Anomalien) 	SPI, BF, fAPAR Anomalien		<ul style="list-style-type: none"> Anlage 4-4 Karten für Europa abrufbar auf http://edo.jrc.ec.europa.eu/
9	Kombinierter Dürreindex <i>Combined drought index</i>	CDI	BALINT et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Besteht aus Niederschlagsdürreindex (<i>precipitation drought index</i>, PDI), Temperaturdürreindex (<i>temperature drought index</i>, TDI) und Vegetationsdürreindex (<i>Vegetation Drought Index</i>, VDI) als Ersatz für einen Bodenfeuchtedürreindex (<i>Soil Moisture Drought Index</i>, MDI) Allgemeine Gleichung zur Berechnung der Einzelindizes DI $DI = V/\bar{V} \cdot \sqrt{D/\bar{D}}$ <p>V: Mittelwert der betrachteten Variable im Betrachtungszeitraum D: aktuelle Länge des kontinuierlichen Defizits (Niederschlag, NDVI) bzw. des Überschusses (Temperatur) im Betrachtungszeitraum Der Überstrich kennzeichnet jeweils den Langzeitmittelwert der Variablen.</p> <ul style="list-style-type: none"> Gleichung zur Berechnung des CDI $CDI = \omega_{PDI} \cdot PDI + \omega_{TDI} \cdot TDI + \omega_{VDI} \cdot VDI \text{ mit } \omega = \text{Gewicht des individuellen Dürreindex}$	P, T, NDVI	<ul style="list-style-type: none"> nicht Messung physikalischer Parameter oder Simulation der Wasserbilanz sondern statischer Index (Maß für die Abweichung der gegenwärtigen Bedingungen vom Normalwert) 	<ul style="list-style-type: none"> Wahl der Gewichte entsprechend der Anwendung, der geographischen Breite und den vorherrschenden Klimabedingungen empfohlene Startwerte für ω: 50 % für PDI und 25-25 % Gewicht für TDI und VDI fehlen Temp. oder NDVI-Werte dann Nutzung 67 % für PDI und 33 % für den anderen Index

Hinweise: Abkürzungen der Eingangsdaten: P – Niederschlagssumme im jeweiligen Betrachtungszeitraum, T –Lufttemperatur, ETP – potenzielle Evapotranspiration, Q – Abfluss, GW: Grundwasser, SC: Schneedecke(nspeicherung); ReS: Reservoirspeicher, BF – Bodenfeuchte. Für Abkürzungen der Dürreindizes siehe Abkürzungsverzeichnis

3.9 Vergleichsstudien zu meteorologischen Dürreindizes

Verschiedene Autoren haben für unterschiedliche Regionen die Leistungsfähigkeit verschiedener Dürreindikatoren verglichen und kamen dabei in Abhängigkeit von der Region sowie den verwendeten Bewertungskriterien zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich des optimalen/besten Dürreindexes. Die Dürreindizes wurden dabei zumeist mit dem Palmer-Index als Referenzindex verglichen, welcher später durch den SPI als Referenz abgelöst wurde. Vor allem hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des PDSI und des SPI für das Dürremonitoring existieren vielfältige Vergleichsstudien (z. B. GUTTMAN 1999; HAYES ET AL. 2000; KEYANTASH & DRACUP 2002; LLOYD-HUGHES & SAUNDERS 2002; SIMS et al. 2002; QUIRING & PAPAKYRIAKOU 2003). Im Ergebnis dieser Studien können folgende Unterschiede zwischen dem SPI und PDSI festgehalten werden (ZARGAR et al. 2011):

- Einige Eigenschaften des PDSI sind standortabhängig, während die SPI-Werte standortunabhängig sind (z. B. GUTTMAN 1999). Dadurch bietet der SPI auch eine bessere räumliche Standardisierung in Bezug auf extreme Dürreereignisse (LLOYD-HUGHES & SAUNDERS 2002).
- Der PDSI hat eine komplexe (Berechnungs-)Struktur und ein ungewöhnlich langes Gedächtnis, während der SPI ein einfach zu interpretierender gleitender Mittelwert-Ansatz ist (GUTTMAN 1998). Aufgrund seiner Eigenschaften als standortunabhängiger, einfacher, probabilistischer Dürreindex kann der SPI als Primärindex in der Risiko- und Entscheidungsanalyse verwendet werden (GUTTMAN 1998).
- Der SPI kann Kurzzeit-Niederschläge besser widerspiegeln und ist daher ein besserer Indikator für die Bodenfeuchtevariationen bzw. den Bodenfeuchtezustand (SIMS et al. 2002) und damit auch ein besserer Prädiktor für den Ernteertrag (QUIRING & PAPAKYRIAKOU 2003).

SPI und PDSI wurden natürlich nicht nur untereinander, sondern auch mit einer Vielzahl weiterer Dürreindizes verglichen. Dabei wurden von einigen Autoren Kriterien zur Bewertung der Dürreindizes entwickelt. Häufig werden dabei die von KEYANTASH & DRACUP (2002; Anlage 5-2) vorgeschlagenen Kriterien Robustheit (*robustness*), Anwendbarkeit (*tractability*), Transparenz (*transparency*), Komplexität (*sophistication*), Erweiterungsfähigkeit (*extendability*) und Dimensionalität verwendet (z. B. QUIRING & PAPAKRYIAKOU 2003, BARUA et al. 2011). Zum Teil wurden auch Korrelationen zu verschiedenen Impactvariablen untersucht und in die Bewertung einbezogen (z. B. VICENTE-SERRANO et al. 2012a; Anlage 5-6). Als wesentliche Studien des Vergleichs von mindestens drei verschiedenen Dürreindizes sind zu nennen:

- OLAPIDO (1985): *A comparative performance of three meteorological drought indices* – RAI, BMDI, PDSI (Anlage 5-1) → ähnliche Leistungsfähigkeit
- KEYANTASH & DRACUP (2002): *The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices* – CPD, DI, PDSI, DAI, RAI, SPI, CMI, Z-Index, berechnete Bodenfeuchte, SMA-Index, Gesamtwasserdefizit, kumulative Abflussanomalien, PDHI, SWSI (Anlage 5-2) → Dezile & SPI als beste meteorologische, berechnete Bodenfeuchte als bester landwirtschaftlicher und Gesamtwasserdefizit als bester hydrologischer Dürreindex
- HEIM (2002): *A review of twentieth-century drought indices used in the United States* – weniger Vergleich der Dürreindizes als umfangreiche Kompilation wesentlicher Dürreindizes (Anlage 5-3)
- QUIRING & PAPAKRYIAKOU (2003) *An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies* – PDSI, Z-Index, SPI and NDI → Z-Index geeignetster Index für das Monitoring landwirtschaftlicher Dürren
- NARASIMHAN & SRINIVASAN (2005) *Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring* – SMDI, ETDI, SPI, PDSI → positive Korrelationen des SMDI und ETDI mit dem SPI und PDSI; PDSI am stärksten mit dem SPI-9 und SPI-12 korreliert; hohe Korrelation der Weizen- und Hirseerträge mit dem ETDI und SMDI während der Wochen kritischer Wachstumsphasen

- MORID et al. (2006): *Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran* – DI, PN, SPI, China-Z Index (CZI), modified CZI (MCZI), Z-Index, EDI (Anlage 5-4) → EDI zusammen mit dem SPI für ein operationelles Dürremonitoring vorgeschlagen
- PAULO & PEREIRA (2006) *Drought concepts and characterization: Comparing drought indices applied at local and regional scales* – Theory of runs, PDSI, SPI → einige Schwierigkeiten mit run theory, da sie die subjektive Definition von Schwellenwerten benötigt und keine standardisierte Klassifikation der Dürreschwere bietet; Verwendung des SPI ist angemessen, jedoch hat die Kombination verschiedener Indizes Vorteile.
- AMOR et al. (2009) *Using and Testing Drought Indicators* – SPI, SQI, SRI, PSDI, RDI, “Run Method“ → im Design generischer Indizes notwendige Vereinfachungen und Verallgemeinerungen vermindern ihre Einsatzfähigkeit für operationale Anwendungen (Anlage 5-5)
- QUIRING (2009) *Developing objective operational definitions for monitoring drought* – Berechnung meteorologischer Dürreschwellenwerte für den PDSI, SPI und PN → Verwendung subjektiver operationaler Dürredefinitionen kann zu Über- und Unterschätzungen der Dürreschwere führen, weshalb die Verwendung objektiver, ortsspezifischer Methoden zur Ableitung operationaler Dürreschwellenwerte sinnvoller ist.
- BARUA et al. (2011) *Comparative evaluation of drought indexes: Case study on the Yarra River catchment in Australia* – PN, Dezile, SPI, SWSI, ADI → ADI war für das Dürremanagement im Einzugsgebiet des Flusses Yarra der überlegene Index
- ANDERSON et al. (2011) *Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States* – ESI (*Evaporative Stress Index*), ETI (basierend auf Fernerkundungsdaten), SPI, PDSI, mPDSI, Z-Index, PHDI, US-DM → ESI verhält sich auf kurzen Zeitskalen (bis 6 Monate) ähnlich den niederschlagsbasierten Indizes, er kann jedoch mit einer höheren räumlichen Auflösung und ohne Vorhandensein von Niederschlagsdaten produziert werden. Daher ist er ein guter Zusatz des derzeitigen Dürreindexensembles mit besonderem Mehrwert in Regionen mit wenigen oder unzuverlässigen Niederschlagsdaten.
- VICENTE-SERRANO et al. (2012a): *Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications* – SPI, SPEI und vier Versionen des PDSI (PDSI, mPDSI, PHDI, Z-Index) → überragende Fähigkeit der auf unterschiedlichen Zeitskalen berechneten Indizes SPEI und SPI die Dürreauswirkungen in den betrachteten hydrologischen, landwirtschaftlichen und ökologischen Variablen wiederzugeben; Unterschiede zwischen SPI und SPEI gering, jedoch fing der SPEI die Dürrereaktionen im Sommer am besten ein, wo die Bewertung der Dürreauswirkungen am relevantesten ist (Anlage 5-6).

Die Auswahl des passenden Dürreindex wird nach einer von STEINEMANN et al. (2005) durchgeführten Umfrage durch die folgenden Faktoren getrieben:

- Passfähigkeit für den untersuchten Dürreotyp
- Datenverfügbarkeit
- Kosten
- Konsistenz (Qualität) und Praktikabilität
- Klarheit
- Wissenschaftliche Validität
- Zeitliche und räumliche Sensitivität (Dauer und regionsabhängige Variabilität)
- Spezifität (Spezifische Andauer und räumliche Skala, z. B. Wassereinzugsgebiet vs. Klimabezirk)
- Vorhandensein gut definierter Schwellenwerte und Kriterien (für Beginn und Ende von Dürren)
- Statistische Konsistenz (innerhalb der Dürrestufen und mit anderen Indizes)

3.10 Dürremonitoringzentren

Auf nationaler, regionaler und kontinentaler Ebene existieren eine Vielzahl an Zentren, Organisationen und Observatorien, die das Auftreten von Dürre unter Nutzung verschiedener (Kombinationen von) Dürreindizes auf verschiedenen Zeit- und Raumskalen überwachen. Einige von ihnen stellen dem Anwender wöchentlich bis monatlich Karten des aktuellen Dürrezustandes, ebenso wie die zugrundeliegenden Daten sowie Expertenbewertung der Indexergebnisse bereit. Zudem bieten die Internetseiten der Dürrezentren eine Informationsplattform zum Dürrephänomen und dessen Messung. Viele von ihnen zielen auf eine Vernetzung von Fachwissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen und Anwendern aus Industrie, Verwaltung und Politik ab, um zukünftig auftretenden Dürren besser vorbereitet entgegen treten zu können.

In Europa existieren drei Zentren, wobei sich zwei Gesamteuropa (*European Drought Centre* EDC, Anlage 6-1 und *European Drought Observatory* EDO, Anlage 6-2) und eines des Südosteuropäischen Raum (*Drought Management Center for South Eastern Europe* DMCSEE, Anlage 6-3) widmet. Während das EDC eher als Netzwerk von Wissenschaftler und Praktikern fungiert, stellt das EDO verschiedene Karten zur Bewertung des gegenwärtigen Dürrezustandes bereit (z. B. anhand des kombinierten Dürreindex, Anlage 4-4). Als Beispiel einer nationalen Informationsplattform in Europa sei die Informationsplattform zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz (Anlage 6-4) genannt, welche sich jedoch noch in der Testphase befindet. Eines der bekanntesten und aktivsten Dürremitigationszentren weltweit ist das nationale Dürremitigationszentrum der USA (NDMC; Anlage 6-5). Es stellt dem Anwender eine Vielzahl von Werkzeugen zur Bewertung der Schwere und Auswirkungen von aktuellen Dürren bereit. Neben einer Vielzahl „einfacher“ Dürreindizes wurden am NDMC auch der US Dürremonitor (Anlage 4-1) und der *Vegetation Drought Response Index* VegDRI (Anlage 4-3) als kombinierte Dürreindizes entwickelt. Als Weiterentwicklung des NDMC und des US Dürremonitors ist der nordamerikanische Dürremonitor (*North America Drought Monitor* NADM; <http://www.drought.gov/nadm/>) zu verstehen. Durch die Kooperation zwischen Experten aus Kanada, Mexiko und den USA wurde der US-Dürremonitor zu einem kontinentalen Werkzeug der Überwachung von Dürren ausgebaut.

Auch in Afrika (*African Flood and Drought Monitor*; <http://drought.icpac.net/>) und Asien (*Southwest Asia Drought Monitor* SADM, Anlage 6-6) gibt es Bestrebungen, aktuelle Dürreinformationen zentral und systematisch bereitzustellen. Bis zu einem globalen Dürreinformationssystem, wie es von HEIM & BREWER (2012) beschrieben wurde, ist jedoch noch ein Stück Weg zu gehen. Bisher bietet die Plattform des *Global drought information system* <http://www.drought.gov/gdm/> bis auf weltweite SPI-Produkte eher lückenhafte Informationen auf der Basis der beteiligten nationalen/kontinentalen Partnerplattformen. Beteiligt sind für Nordamerika der *North America Drought Monitor*, für Europa das *European Drought Observatory*, für Afrika der *African Flood and Drought Monitor* (<http://drought.icpac.net/>) und der *Experimental African Drought Monitor* (http://hydrology.princeton.edu/~justin/research/project_global_monitor/), für Australien der Monitor des Landwirtschaftsministeriums (<http://www.daff.gov.au/abares/monitor>) und der australische Wetterdienst (<http://www.bom.gov.au/>). Südamerika und Asien sind momentan noch nicht durch regionale Plattformen repräsentiert.

3.11 Software-Packages

Zur Beschreibung von Dürrezuständen und der Berechnung verschiedener Dürreindizes werden verschiedene Computerprogramme bereitgestellt, die dem Anwender die Bewertung von Dürreereignissen inklusive des Ergreifens passender Maßnahmen erleichtern sollen. Zu diesen Softwarepaketen gehört beispielsweise das SCI-Package *Standardized Climate Indices*⁴. Dieses ist eine freie Erweiterung der R-Sprache und berechnet den SPI, den SPEI und den SRI. Zudem kann der Nutzer wählen hinsichtlich der statistischen Verteilung zur Datentransformation, der Maximum-Likelihood-Schätzung und der Verwendung von Referenzperioden.

Eine weitere kürzlich bereitgestellte Software namens DrinC (*Drought Indices Calculator*; TIGKAS et al. 2014) berechnet neben den bekannten Indizes SPI und Dezile auch den Reconnaissance Dürreindex (RDI) und den Abflussdürreindex (*Streamflow Drought Index*, SDI). Zudem bietet die Software die Möglichkeit, die potenzielle Verdunstung (PET) durch temperaturbasierte Methoden zu schätzen, was für die Berechnung des RDI nützlich ist.

Darüber hinaus existieren noch viele weitere Programme bzw. Programmcodes zur Berechnung einzelner oder mehrerer ausgewählter Dürreindizes.

4 Datengrundlage

4.1. Eingangsdaten der Dürreindexberechnungen

Ausgewählte Dürreindizes wurden exemplarisch für fünf Klimastationen in Sachsen und Umgebung berechnet. Auswahlkriterien für die Stationswahl waren: 1. Datenreihen liegen für den Zeitraum 1961–2013 vor, 2. Station besitzt das komplette Messprogramm von Klimaparametern, 3. Datensätze für alle Klimaparameter sind möglichst lückenlos. Basierend auf diesen Kriterien wurden die Stationen Dresden-Klotzsche, Görlitz, Chemnitz, Fichtelberg und Wittenberg ausgewählt (Tabelle 10). Diese Stationen repräsentieren verschiedene Naturräume Sachsens (Abbildung 3). Die Station Wittenberg liegt wenige Kilometer elbabwärts von der Landesgrenze Sachsens entfernt.

Tabelle 10: Übersicht der untersuchten Klimastationen

ID	Station	Breite	Länge	Höhe
853	Chemnitz	50,791	12,872	418
1048	Dresden-Klotzsche	51,128	13,754	227
1358	Fichtelberg	50,428	12,954	1213
1684	Görlitz	51,162	14,951	238
5629	Wittenberg	51,889	12,645	105

Sämtliche Berechnungen basieren auf Tagesdaten, um die Konsistenz zwischen auf verschiedenen zeitlichen Skalen berechneten Dürreindizes zu gewährleisten. Werden für die Dürreindizes Monatsdaten oder zeitlich

⁴ <http://www.geo.uio.no/edc/>

noch höher aggregierte Daten benötigt, so wurden diese aus den Tagesdaten abgeleitet. Hinsichtlich der Datenvollständigkeit zur Berechnung dieser aggregierten Werte wurden folgende Kriterien verwendet:

- Für Klimaelemente, die durch Mittellung berechnet werden (z. B. Mittlere Tagestemperatur T_m): 90 % der Daten vorliegend, d. h. pro Monat dürfen zwei Tage fehlen.
- Für Klimaelemente, die durch Summation berechnet werden (z. B. [korrigierter] Niederschlag P_k , Sonnenscheindauer SD): 95 % der Daten vorliegend, d. h. pro Monat darf höchstens ein Tag fehlen.
- Für abgeleitete Größen, die aus gemittelten und summierten Größen berechnet werden (z. B. potenzielle Evapotranspiration ETP): 90 % der Daten vorliegend, d. h. zwei Tage dürfen pro Monat fehlen.

Die Anzahl von Fehltagen inklusive der Angabe zu deren zeitlichen Auftreten an den fünf untersuchten Stationen ist in Tabelle 11 für alle relevanten Klimaparameter aufgelistet. Für die Analyse der ausgewählten meteorologischen Dürreindizes werden P_k und ETP benötigt. Wie aus Tabelle 11 ersichtlich wird, gibt es lediglich an zwei Stationen Fehlwerte. Weil das Kriterium der Datenvollständigkeit für die zwei Elemente nicht verletzt wurde, können alle fünf Stationen über die gesamte Zeitreihe analysiert werden.

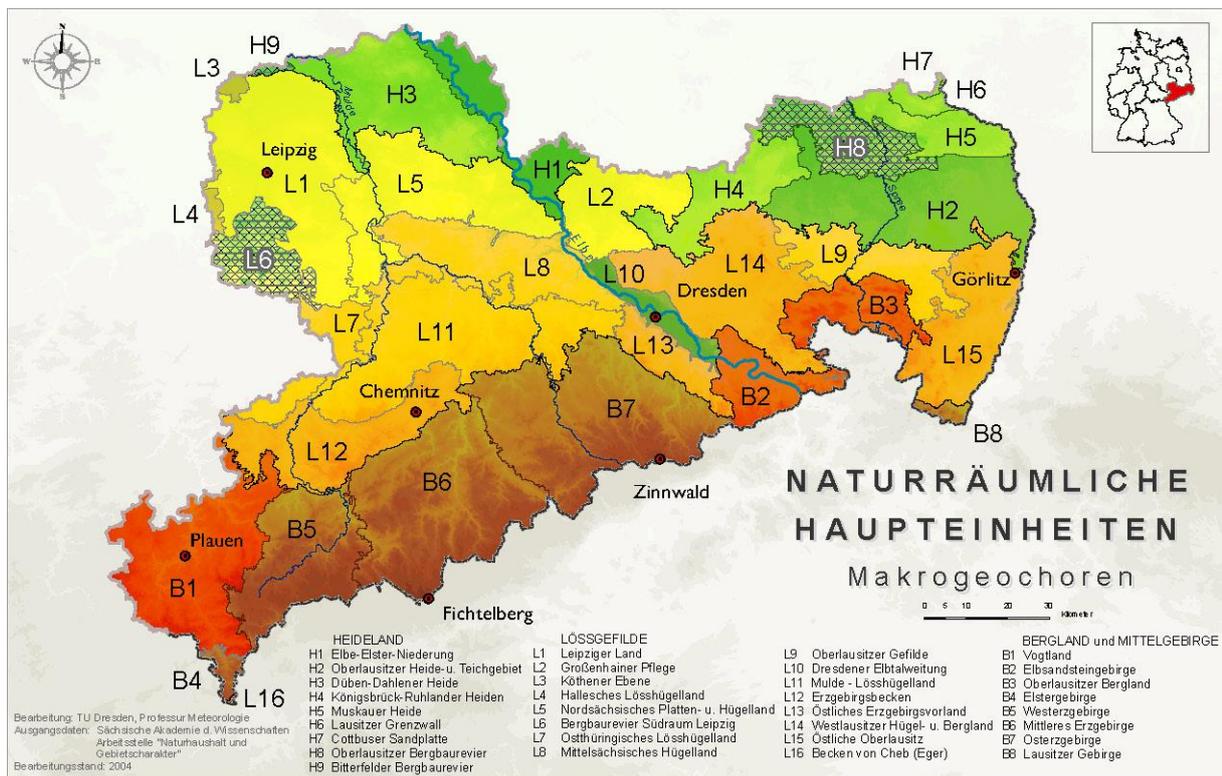
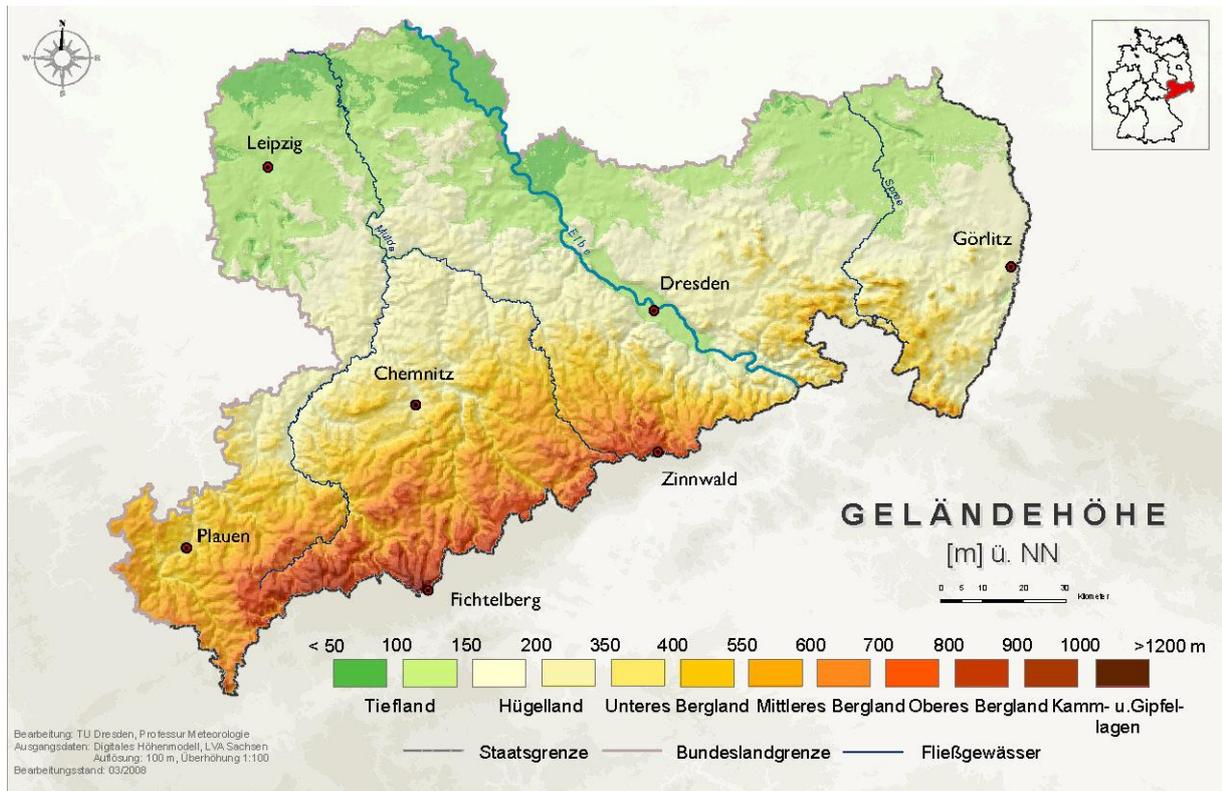


Abbildung 3: Geländehöhen und Naturräumliche Einheiten Sachsen (aus BERNHOFER et al. 2008)

Tabelle 11: Fehlwerte pro Monat an den untersuchten Klimastationen

Station	Mon	Jahr	Pk	Tm	Tx	Tn	SD	ETP
Dresden-Klotzsche	11	1963	0	0	1	0	0	1
Wittenberg	1	1994	0	0	0	0	1	1
Wittenberg	11	2005	0	0	2	2	1	2
Wittenberg	1	2006	0	0	2	2	0	2
Wittenberg	3	2006	1	0	2	2	2	2
Wittenberg	4	2008	0	0	0	0	1	1

4.2. Eingangsdaten der Starkniederschlagsanalysen

Die Datengrundlage bilden korrigierte tägliche Niederschlagssummen für den Zeitraum 01.01.1961–31.12.2010 (Quelle: Deutscher Wetterdienst und Tschechischer Hydro-Meteorologischer Dienst). Es handelt sich um Zeitreihen mit Tagessummen für den Niederschlag aus dem Klima- (KL) und Niederschlagsmessnetz (RR) für die erweiterte Region Sachsens. Aus diesen Rohdaten wurden am Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie konsistente, homogene Datensätze erzeugt.

Eine flächenhafte Verteilung des Niederschlags wurde mit ReKIS (Regionalisiertes Klimainformationssystem; www.rekis.org) mittels Interpolation erreicht. Das Web-basierte Interpolationstool RaKliDa (Rasterklimadaten) generiert Rasterdaten aus punktuell gemessenen Zeitreihen (BERNHOFER et al. 2009). Des Weiteren wird ein digitales Höhenmodell aus SRTM-Fernerkundungsdaten (*Shuttle Radar Topography Mission*) verwendet. Die hohe räumliche Variabilität des Niederschlags in Sachsen wird durch die Abhängigkeit zur Seehöhe und durch kleinräumige Luv- und Leeeffekte verursacht. Wesentlich für die Wahl des Interpolationsverfahrens ist, dass die verteilungsrelevanten Abhängigkeiten erfasst werden. Für tägliche Niederschlagssummen verwendet das RaKliDa-Tool zum Beispiel das Indikator-Kriging, um inselhafte Niederschläge adäquat erfassen zu können. Aus observierten punktuellen Zeitreihen wurden tägliche Niederschlagsfelder mit einer Auflösung von 1 x 1 km für Sachsen generiert. Das Tool ExtRa (Programm-gesteuerte Extrahierung von Rasterzellen-bezogenen Zeitreihen, FRANKE 2013) extrahiert aus dem RaKliDa-Output (tägliche Niederschlagsfelder) Rasterzellen bezogene Zeitreihen. Für Sachsen wurden damit für ein 1 x 1 km-Raster Zeitreihen erzeugt. In der Summe stehen Zeitreihen für 19.572 Pseudostationen Sachsens für den Zeitraum 01.01.1961–31.12.2010 zur Verfügung (BERNHOFER et al. 2015). Es ist zu beachten, dass die Qualität der interpolierten Zeitreihen maßgeblich von der Anzahl der Stützstellen, also den observierten Zeitreihen, abhängt.

5 Methoden

5.1. Modell METVER

Für die Berechnung der Bodenfeuchte – als Grundvoraussetzung für die Berechnung und Bewertung vieler landwirtschaftlicher Dürreindizes – wurde das von der Abteilung Agrarmeteorologie des Deutschen Wetterdienstes in Leipzig genutzte Modell METVER verwendet. METVER dient nach KAYSER (2002) der Berechnung der Verdunstung auf landwirtschaftlichen Produktionsflächen und arbeitet als Einschichtmodell mit Entzugs- und Nachlieferungssektor. Derzeit lassen sich nach BÖTTCHER et al. (2010) in METVER 27 Frucht- und Anbauarten und dazu beliebige Substrattypen einbinden. METVER benötigt als Inputwerte zur Berechnung meteorologisch-klimatologische Daten (z. B. T_m , SD , P), Bodeninformationen (z. B. F_k , Welkepunkt, Anfangsfeuchte zu Beginn des Berechnungsintervalls) und biologisch-pflanzenphysiologische Faktoren (z. B. Durchwurzelungstiefe, Interzeptionskapazität).

Für diesen Bericht wurde mit METVER der Bodenwasserhaushalt an den fünf ausgewählten Untersuchungsstandorten für den Zeitraum 1961–2013 (Ausnahme: Dresden-Klotzsche für 1967–2013) berechnet. Die Modellierungen erfolgten beispielhaft für die Fruchtart Winterweizen (ohne Zwischenfrucht) unter Verwendung der Bodenparameter der Altkreise (Tabelle 12).

Tabelle 12: Mittelwerte der Feldkapazität, des Welkepunktes und des maximalen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrates verschiedener Kreise der ehemaligen Bezirke Halle, Chemnitz und Dresden für die Schicht 0–200 cm (MÜLLER et al. 1995)

Kreis	Feldkapazität (mm)	Welkepunkt (mm)	Maximaler pflanzenverfügbarer Bodenwasservorrat (mm)
Annaberg	346	127	219
Chemnitz	526	220	306
Chemnitz (Stadt)	465	188	277
Dresden	388	144	244
Dresden (Stadt)	489	222	267
Görlitz	496	198	298
Görlitz (Stadt)	469	189	280
Wittenberg	370	169	201

Als Output liefert das Modell die potenzielle (ETP) und aktuelle Evapotranspiration (AET) für die Fruchtart am jeweiligen Standort sowie die Bodenfeuchte in Prozent der nutzbaren Feldkapazität und in Volumenprozent in täglicher Auflösung. Diese Daten können als Grundlage für die Berechnung einer großen Auswahl an landwirtschaftlichen Dürreindizes verwendet werden. Für den Vergleich mit den zumeist auf monatlichen Skalen aggregierten Dürreindizes wie SPI und SPEI ist eine zeitliche Aggregation der Bodenfeuchtedaten notwendig. Beispielhaft werden in Abschnitt 6.3 die METVER-Ergebnisse für den Winterweizen mit den meteorologischen Trockenperioden sowie als Monatsmittelwerte mit dem SPI und SPEI verglichen.

5.2. Berechnete Dürreindizes

Einige wenige der in diesem Bericht vorgestellten Dürreindizes wurden für die ausgewählten Klimastationen berechnet. Dabei wurden ausschließlich auf Klimadaten beruhende – sprich meteorologische – Dürreindizes berechnet. Es wurden Indizes ausgewählt, die auf unterschiedlichen Eingangsdaten beruhen (T, P, P&T) sowie unterschiedliche zeitliche Skalen abdecken. Als Eingangsgröße für den Niederschlag wurde für alle Dürreindizes der nach RICHTER (1995) korrigierte Niederschlag Pk verwendet.

Als rein temperaturbasierten Dürreindex wird der *Warm Spell Duration Index* (WSDI; Gesamtzahl der Tage, die den mindestens sechs Tage andauernden Warmperioden zugeordnet sind; Anlage 1-1) untersucht, welcher auf Tagesdaten der Maximaltemperaturen ($T_x > 90$. Perzentil) basiert. Auf der Basis von Tagesniederschlagsdaten wurden die meteorologischen Trockenperioden (Folge von mindestens 11 Tagen mit Niederschlagssummen ≤ 1 mm; Anlage 1-2) berechnet; auf der Basis von Monatsniederschlagsdaten der *Standardized Precipitation Index* (SPI; Anlage 1-13) als Index zur Beschreibung der Dürreschwere sowie die Dezil-Trockenperioden (Anlage 1-8) als Index zur Beschreibung der Andauer von Dürreereignissen. Unter Einbeziehung der potenziellen Verdunstung wurden die klimatische Wasserbilanz ($KWB = P_k - ETP$) und der *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI; Anlage 1-20) berechnet. SPI, SPEI und KWB wurden für unterschiedliche Zeitskalen berechnet:

- 1 Monat: kurzfristige Klimavariabilität mit ersten Auswirkungen auf die Bodenfeuchte
- 3 Monate: kurz- bis mittelfristige Dürren mit Auswirkungen im Bereich der Landwirtschaft
- 12 Monate: langfristige Dürren mit potenziellen ökologischen und hydrologischen Auswirkungen
- 24 Monate: besonders langfristige Dürren mit Einfluss auf die Wasserversorgung (Grundwasserstände- und Talsperrenfüllung)

Als Referenzzeitraum zur Bestimmung des „normalen Klimas“, gegenüber dem die Indizes den aktuellen Feuchtezustand bewerten, wurde der Zeitraum 1961–2000 genutzt. Dieser 40-Jahres-Zeitraum stellt einen Kompromiss dar zwischen der häufig genutzten 30-jährigen Klimareferenzperiode 1961–1990 und der Empfehlung, für die Standardisierung der Indizes möglichst lange Zeiträume (50+ Jahre) zu verwenden. Zudem kann der Großteil der meteorologischen Indizes auch für Klimaprojektionsdaten berechnet werden. Die Validierung dieser Klimamodelle erfolgt für deren so genannten 20C-Lauf zumeist für den Zeitraum 1961–2000. Für Untersuchungen zu zukünftigen Veränderungen in der Trockenheit ist es wichtig, für die Beobachtungs- und Klimaprojektionsdaten den gleichen Zeitraum zur Standardisierung der Indizes zu verwenden. Nur so ist eine konsistente Bewertung des Klimawandels möglich. Der für 1961–2000 etablierte Zusammenhang der Dürreindizes zu den jeweiligen Feuchtebedingungen (Dürreklassen einiger Indizes) wird dann auf die gesamte Zeitreihe angewendet.

Für den Vergleich der Ergebnisse der klimatischen Wasserbilanz mit denen des SPI und des SPEI wurde die klimatische Wasserbilanz ($KWBA_s$) auf Monatsbasis standardisiert, d. h. die Anomalie der KWB ($KWBA$) durch die Standardabweichung σ im Zeitraum 1961–2000 geteilt:

$$KWBA_s = \frac{KWBA - \overline{KWBA}}{\sigma}$$

Für die Stationen Dresden-Klotzsche und Görlitz wurde zusätzlich noch der hydrothermale Koeffizient nach SELYANINOV (1937; HTC) mit in den Indexvergleich einbezogen. Der HTC wurde im Projekt KLAPS (MEHLER et al. 2014) berechnet und freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

5.3. Analyse des Starkniederschlagsverhaltens

Für die Untersuchung von Starkregen in Sachsen wurden vier Starkniederschlagsindizes untersucht: R80p, R90p, R95p und R99p. Diese Starkniederschlagsindizes wurden in Anlehnung an den WMO-Index R95pTOT und R99pTOT (KLEIN TANK et al. 2009) definiert und sind Perzentil basiert. Starkregen wird hinsichtlich seiner Regenmenge, der Überschreitungstage und der mittleren Intensität eines Ereignisses analysiert. Im Fokus steht die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregen der vier Perzentile. Tabelle 13 gibt einen Überblick über sämtliche analysierten Niederschlagsindizes. Die Begriffe Starkniederschlag und Starkregen werden synonym verwendet.

Tabelle 13: Niederschlagsindizes für Starkregen R80p, R90p, R95p und R99p

Bezeichnung	Einheit	Zeitraum	Bezugszeitraum
Regenmenge Karte	[mm]	1961–1990	Jahr
Überschreitungstage (kumulativ) Karte	[d]	1961–1990 und 1981–2010	Jahr
mittlere Intensität Karte	[mm/Ereignis]	1961–1990 und 1981–2010	Jahr
Auftrittshäufigkeit AHfk Transekt	[d]	1961–2010	Jahreszeiten, Vegetationsperioden
Karte	[%]	Änderung 1981–2010 vs. 1961–1990	Jahreszeiten, Vegetationsperioden

Starkregen R80p/R90p/R95p/R99p – Regenmenge

Die Höhe des Starkregens wird für jedes Perzentil aus den Daten der Referenzperiode 1961–1990 bestimmt. Beispielsweise wird der Starkregen R80p als Wert des 80. Perzentils aus den Niederschlagstagen (Tage mit Niederschlag ≥ 1 mm) stationsweise bestimmt. Dieser Wert dient als Schwellwert für die nachfolgenden Analysen

Starkregen R80p/R90p/R95p/R99p – Überschreitungstage

Basierend auf der Regenmenge wurden die entsprechenden Überschreitungstage für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010 berechnet. Beispielsweise ist ein Überschreitungstag R80p definiert durch das Erreichen oder Überschreiten der Regenhöhe ($P_k \geq \text{Regenhöhe R80p}$).

Starkregen R80p/R90p/R95p/R99p – mittlere Intensität

Die mittlere Intensität eines Starkregens wurde für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010 berechnet. Sie ergibt sich beispielsweise aus dem Quotienten der Summe der Niederschlagshöhe aller Ereignisse, die größer oder gleich R80p sind und den entsprechenden Überschreitungstagen (entspricht dem WMO-Index R95pTOT und R99pTOT; KLEIN TANK et al. 2009).

Starkregen R80p/R90p/R95p/R99p – Auftrittshäufigkeit AHfk

Die Auftrittshäufigkeit eines Starkregens R80p, R90p, R95p und R99p wurde im zeitlichen Verlauf für 1961–2010 bestimmt. Zur Anwendung kam eine nicht parametrische Kernschätzung für Starkregen R80p, R90p, R95p und R99p, wobei der zeitliche Verlauf als inhomogener Poisson-Prozess aufgefasst wurde. Aufgrund der Komplexität und des Umfangs der Methodik wird diese hier nicht dargestellt, sondern auf SCHALLER (2013)

verwiesen. Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen“ (BERNHOFER et al. 2015) an der TU Dresden angefertigt.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt für die Transekte West-Ost und Nord-Süd für die Bezugszeiträume Sommer, Vegetationsperiode I (April–Juni) und Vegetationsperiode II (Juli–September). Weiterhin werden die Änderungen im Auftreten von Starkregenereignissen R80p-R99p in der Klimanormalperiode 1981–2010 gegenüber 1961–1990 für die Jahreszeiten und Vegetationsperiode I und II flächenhaft dargestellt.

Die Ergebnisse eines Indexes wurden des Weiteren in Form von Boxplots aller Pseudostationen visualisiert. Im Boxplot werden dargestellt: a) der Median (mittlerer fetter Balken), b) das untere und obere Quartil (die untere und obere Begrenzung der Box, die 50 % der Daten umfasst – entspricht dem Interquartilsabstand), c) das Maximum beziehungsweise das Minimum einer Verteilung, sofern diese nicht mehr als das 1,5-Fache des Interquartilsabstands vom Median abweichen (Whiskers) und d) die Ausreißer (einzelne Datenpunkte).

6 Ergebnisse

6.1 Charakterisierung von Trockenheit in Sachsen

Vorbemerkungen zur Lesbarkeit der Abbildungen

Bei den grafischen Darstellungen der Feuchtigkeitsanomalien mittels SPI, SPEI und KWBA (Abbildung 4 bis 6) ist zu beachten, dass negative Indexwerte trockene Bedingungen repräsentieren und dementsprechend positive Indexwerte auf feuchtere Bedingungen im Vergleich zum klimatologischen Mittel hinweisen. Dabei wurden die Werte monatsweise mit dem jeweiligen langzeitlichen Monatsmittel (auf verschiedenen Zeitskalen von 1 bis 24 Monate) und der jeweiligen Standardabweichung normalisiert. Somit wird der Jahresgang entfernt und die Werte spiegeln keine absoluten Trockenheitswerte wider. Der gleiche Indexwert kann also in unterschiedlichen Monaten verschieden große – in Millimeter gemessene – Feuchtigkeitsdefizite wiedergeben. Diese Vorgehensweise entspricht dem allgemein üblichen Vorgehen bei der Bewertung von Dürre, welche im Gegensatz zur Aridität (Bewertung der absolut auftretenden Trockenheit) immer auf einen klimatologischen Langzeitmittelwert bezogen wird. Der Ausgangspunkt dieser Überlegungen ist, dass sich die natürliche Vegetation ebenso wie die menschliche Gesellschaft mit ihren verschiedenen Wirtschaftssektoren jeweils an dieses klimatologische Mittel – einschließlich des typischen Jahresgangs – angepasst hat.

Als Normalbereich werden Indexwerte zwischen -1 und $+1$ festgelegt. Deutlich zu trockene Bedingungen treten dementsprechend bei Indexwerten < -1 auf, bei Indexwerten $< -1,5$ spricht man von „schwerwiegender“ oder „starker Dürre“ und bei Indexwerten von < -2 von „extremer Dürre“. Diese Klassifizierung kann umgekehrt auch auf die im Vergleich zu Normalbedingungen zu feuchten Verhältnisse angewendet werden und gilt für alle betrachteten Zeitskalen. Wird jedoch wie im Falle der obersten Darstellung in Abbildung 4 der Jahresmittelwert aus einzelnen Monatsanomalien aufgetragen, so ist die soeben genannte Feuchteklassifizierung nicht anwendbar – dennoch gilt: je kleiner die Indexwerte, desto trockener ist das entsprechende Jahr zu bewerten.

Für Zeitskalen von mehr als einem Monat werden die Indexwerte gleitend ermittelt und ebenfalls in Monatsauflösung dargestellt. Dabei wird der berechnete Indexwert immer dem letzten Monat des betrachteten Zeitabschnittes zugeordnet, weil das Feuchtigkeitsdefizit bzw. der Feuchtigkeitsüberschuss sich über den Betrachtungszeitraum bis zu diesem Monat akkumuliert hat. Eine Darstellung des Wertes auf die Mitte des Betrachtungszeitraumes würde im Fall der Anwendung im operationalen Dürremonitoring die Vorhersage der

zukünftigen Dürreverhältnisse erfordern. Zudem hat sich ja das Gesamtdefizit bzw. der Gesamtüberschuss zu diesem Zeitpunkt noch gar nicht aufgebaut.

Die hauptsächlich die Andauer einer zuvor festgelegten Dürreintensität beschreibenden Indizes meteorologische Trockenperiode metTP und Dezil-Index DI werden in den Abbildungen durch orange Balken gekennzeichnet. Im Falle der kurzfristigen metTP wird für jeden Monat, in dem eine Trockenperiode beobachtet wurde, ein Balken dargestellt und im Falle der langfristigen DI-Trockenperioden kennzeichnet die Breite der Balken die Andauer der jeweiligen Trockenphase. In der obersten Darstellung der Abbildung 4 werden die Jahressummen der Tage von metTP und dem Warm Spell Duration Index WSDI als Säulen und die aus dem Mittel der zwölf Monatsindexwerte (SPI-1 und SPEI-1) berechneten Feuchtigkeitsanomalien als Linien dargestellt. Damit die metTP und WSDI repräsentierenden Säulen visuell besser mit den Feuchtigkeitsanomalien verglichen werden können, wurden ihre auf der sekundären y-Achse dargestellten Werte invertiert. Je weiter die Säulen in Richtung der negativen Feuchtigkeitsanomaliewerte reichen, desto trockenere Verhältnisse zeigen die Indizes an. Es ist zu beachten, dass die Säulendarstellungen Absolutwerte sind und somit nicht sofort sichtbar wird, ab welchem Indexwert die Verhältnisse „trockener als normal“ sind.

Trockenjahre in Sachsen

Mittels sechs ausgewählter meteorologischer Dürreindizes (*Warm Spell Duration Index* WSDI, meteorologische Trockenperioden metTP, Dezil-Trockenphasen DI, SPI, SPEI, KWBA) werden die Trockenverhältnisse für fünf sächsische Stationen auf verschiedenen Zeitskalen (von wöchentlich, über 1 und 3 Monate bis zu 1 und 2 Jahre) untersucht. Hier dargestellt und diskutiert werden die Ergebnisse exemplarisch für die Station Dresden-Klotzsche. Für die restlichen Stationen sind die Abbildungen in Anlage 7 bis Anlage 10 dargestellt.

Abbildung 4 zeigt in der obersten Teilabbildung den Vergleich der auf Jahresbasis akkumulierten Werte von metTP, WSDI, SPI und SPEI. Besonders trocken waren basierend auf den für das Jahr gemittelten zwölf SPI-Werten die Jahre 1962 bis 1964, 1972, 1976, 1982, 1990 bis 1992, 1996/97, 2003, 2006 und 2011. Dabei werden die Jahre 1962 und 1996 unter Einbeziehung der Temperaturen (z. B. im SPEI über die potenzielle Evapotranspiration) als deutlich weniger trocken bewertet als wenn nur die Niederschläge betrachtet werden. Dagegen sind die Jahre 2005 und 2012 unter Einbeziehung der durch die hohen Temperaturen gesteigerten potenziellen Verdunstung zusätzlich als trockene Jahre zu klassifizieren. Bei den anderen Trockenjahren macht es dagegen kaum einen Unterschied, ob neben den Niederschlägen auch die potenzielle Evapotranspiration in die Dürrebewertung einbezogen wird. Die drei Jahre mit den meisten meteorologischen Trockenperiodentagen waren 1982 (156 d), 2003 (130 d) und 2006 (119 d) – allesamt auch als Trockenjahr identifiziert. Es gibt jedoch auch Jahre mit insgesamt deutlich positiven Niederschlagsanomalien, die mit einer großen Zahl an Trockenperiodentagen gekoppelt sind, wie beispielsweise 1965 (85 d) und 1986 (104 d). Die wenigsten Trockenperioden traten in den beiden Nassjahren 1970 (12 d) und 1987 (11 d) auf.

Jahre mit außergewöhnlich vielen Warmphasen ($T_x > 90$. Perzentil; WSDI) zugeordneten Tagen waren 1990 (27 d), 1993 (34 d) und 2007 (27 d) – diese Jahre zeigen kaum Übereinstimmung mit den durch SPI und SPEI identifizierten Dürrejahren. In fast der Hälfte der betrachteten Jahre wurden keine Warmphasen beobachtet – dies trifft auch für das als Hitzejahr bekannt gewordene Jahr 2003 zu, in dem ein großer Teil West- und Mitteleuropas unter einer starken Hitzewelle litt. Der verwendete WSDI identifiziert an der Station Dresden-Klotzsche diese Hitzewelle jedoch nicht – der Schwellenwert von sechs aufeinanderfolgenden Tagen mit $T_x > 90$ % wird mehrfach knapp verfehlt.

In der Zeitreihe des WSDI erkennt man eine deutliche Zunahme der Häufigkeit von Warmphasantagen in den 1990er-Jahren und Anfang des 21. Jahrhunderts. Betrachtet man den Trend in den niederschlagsbasierten

Indizes (SPI), so erkennt man eine leichte Tendenz zu größerer Trockenheit – dieser Trend intensiviert sich, wenn wie durch den SPEI die stark temperaturgesteuerte Verdunstung mit einbezogen wird. Auf der Basis von Jahreswerten zeigt sich keine Veränderung in der Häufigkeit von Trockenperiodentagen, jedoch zeigen andere Untersuchungen Zunahmen von Trockenperiodentagen im Sommerhalbjahr (insbesondere in der Vegetationsperiode I; BERNHOFER ET AL. 2015). Hier sind zusätzliche jahreszeitendifferenzierte Analysen der Dürreindizes angeraten.

Der Vergleich unterschiedlicher Zeitskalen zeigt zunächst, dass die Indexwerte erwartungsgemäß auf den kurzen Zeitskalen (vor allem 1 Monat) zeitlich stärker variieren als auf den langen Zeitskalen (12–24 Monate). Während einer langandauernden Trockenphase können durchaus auch einzelne Monate mit großen positiven Niederschlagsanomalien auftreten und in als nass klassifizierten Jahren kann, wie schon beschrieben, auch eine große Zahl meteorologischer Trockenperioden auftreten. In 11 Fällen ist der SPI-1 < -1 , während der SPI-24 $> +1$ ist (z. B. 11/1967, 02/1975, 02&07/1982, 04-05-08-10/1988, 02&11/2011, 03/2012) und in vier Fällen ist der SPI-1 $> +1$, während der SPI-24 < -1 ist (z. B. 10/1964, 01/1965, 04/1973, 11/2004). Schon bei der Akkumulation der Niederschläge über drei Monate zeigen sich persistenterere Trocken- und auch Nassphasen als für die Monatswerte. Diese treten dann auf der Aggregationsebene von 12 und 24 Monaten noch deutlicher hervor.

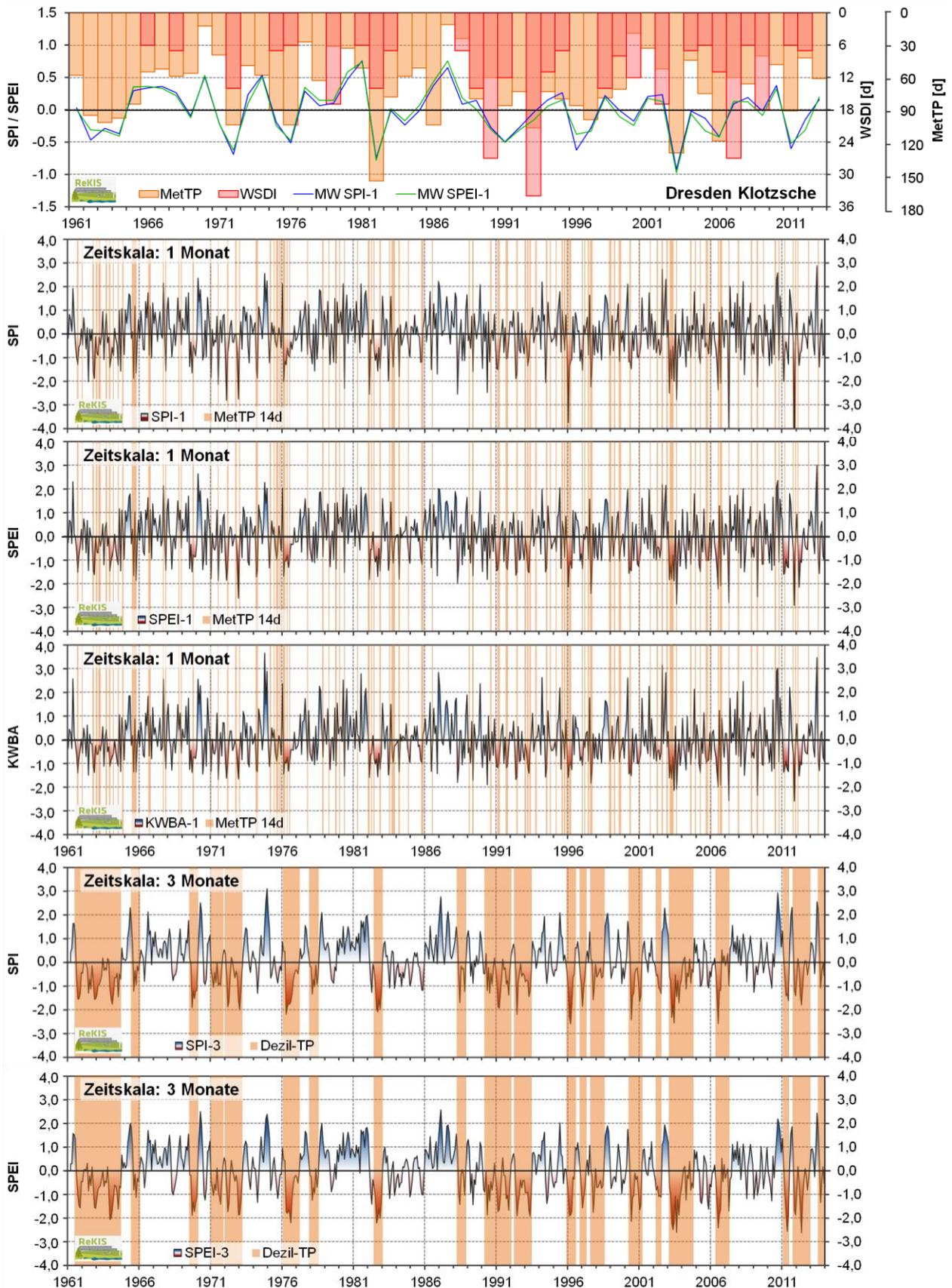


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes an der Station Dresden-Klotzsche für die auf Jahresbasis akkumulierten Werte (oben) und die Zeitskalen 1 und 3 Monate

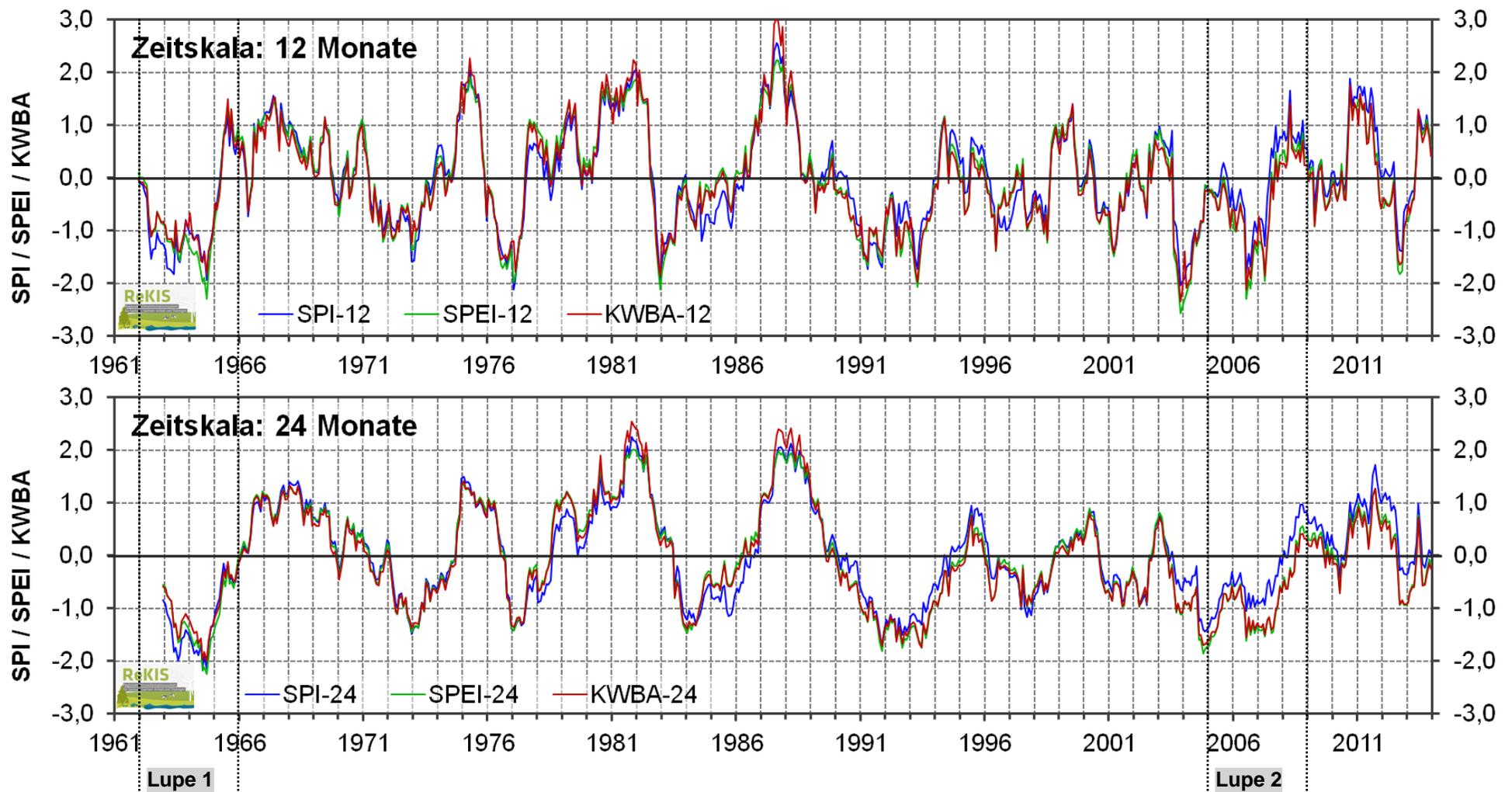


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes an der Station Dresden-Klotzsche für die Zeitskalen 12 und 24 Monate mit Kennzeichnung der in Abbildung 6 dargestellten „Lupen“ausschnitte

6.2 Vergleich und Bewertung ausgewählter Dürreindizes

WSDI: Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bewertung von Trockenheit auf der Basis von nur aus Temperaturwerten abgeleiteten Indizes nur bedingt funktioniert. Der untersuchte WSDI zeigt nur zeitweise Übereinstimmungen mit den niederschlagsbasierten sowie den Niederschlag und Verdunstung einbeziehenden Indizes. In dem extremen Dürrejahr 2003 ist keine Warmphase nach WSDI aufgetreten – im Mittel war die Temperaturanomalie dieses Jahres jedoch sehr groß.

metTP: Im Allgemeinen treten in den mittels des SPI oder SPEI identifizierten Trockenjahren mehr meteorologische Trockenperioden auf als normal (Abbildung 4; oberer Abbildungsblock). Aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung zwischen den meteorologischen Trockenperioden (wenige Wochen; basierend auf Tageswerten) und der Einschätzung der Feuchtigkeitsbedingungen eines gesamten Jahres, ist jedoch kein sehr enger Zusammenhang zu erwarten. Bedingt durch das Auftreten von Starkniederschlägen – im Wechsel mit trockenen Phasen – kann ein Jahr (bzw. Monat) hinsichtlich der Feuchtigkeitsbedingungen als nass klassifiziert werden und dennoch eine große Zahl an meteorologischen Trockenperioden (Tagen) beinhalten (Abbildung 4; mittlerer Abbildungsblock). Trockenperioden mit einer Dauer von mindestens 14 Tagen treten zumeist in den Monaten mit negativen Feuchteanomalien auf. In der Abbildung ist dabei ein Monat als „Trockenperiodenmonat“ gekennzeichnet, wenn mindestens 7 Tage einer 14-tägigen Trockenperiode in diesem Monat liegen, d. h. liegen beispielsweise von einer 15-tägigen Trockenperiode 7 Tage in einem Monat und 8 Tage im Folgemonat, so werden beide Monate markiert. Es gibt jedoch auch immer wieder Monate mit großen positiven Feuchteanomalien, in denen dennoch eine mindestens 14-tägige Trockenperiode (zumindest 7 Tage davon) liegt. So tritt in vier Monaten eine positive Feuchteanomalie von > 1 auf, während gleichzeitig mindestens die Hälfte des Monats trocken ist (mindestens 15 d die zu metTP gehören). Dies sind:

- September 1965 (SPI-1 = 1,17; SPEI = 1,03; KWBA = 0,79; metTP = 15 d; $2 \times P > 20$ mm; $P_{\max} = 26,5$ mm)
- August 1983 (SPI-1 = 1,59; SPEI = 1,45; KWBA = 1,48; metTP = 19 d; $4 \times P > 20$ mm; $P_{\max} = 41,7$ mm)
- August 2002 (SPI-1 = 2,72; SPEI = 2,19; KWBA = 3,16; metTP = 17 d; $2 \times P > 20$ mm; $P_{\max} = 160,4$ mm)
- Oktober 2006 (SPI-1 = 1,14; SPEI = 1,10; KWBA = 0,84; metTP = 15 d; $2 \times P > 20$ mm; $P_{\max} = 22,6$ mm)

Die positiven Feuchteanomalien sind in diesen Fällen eindeutig auf einzelne (und zum Teil über mehrere Tage hinweg auftretende) Starkniederschlagsereignisse zurückzuführen. Weil im Rahmen des regionalen Klimawandels in Sachsen ein gleichzeitiger Anstieg von meteorologischen Trockenperioden und Starkniederschlagsereignissen diskutiert wird, kann in Zukunft der Zusammenhang zwischen metTP und anderen Dürreindizes (SPI, SPEI, KWBA) auf der zeitlichen Aggregationsebene von Jahreszeiten bzw. Jahren weiter aufgeleuchtet werden. Neben der Analyse von Dürren auf der Basis von Monats- und Jahreswerten sind daher auf Tagesdaten basierende Analysen von großer Bedeutung, auch wenn die metTP nicht die ebenfalls entscheidenden Evapotranspirationsraten mit einbeziehen.

Dezile: Weil die Dezil-Trockenperioden basierend auf Dreimonatsniederschlagssummen berechnet wurden, zeigen sie gute Übereinstimmungen mit dem SPI-3 und SPEI-3 (Abbildung 4; unten). In vielen Fällen kennzeichnen die Dezil-Trockenperioden die Zeitabschnitte, in denen die SPI-3- und SPEI-3-Werte längere Zeit negativ sind und dabei den Wert -1 unterschreiten. Damit können die Dezile näherungsweise zur Beschreibung und Untersuchung der Andauer (und räumlichen Charakteristika) von durch den SPI-3/SPEI-3 identifizierten Dürreperioden verwendet werden. Die jeweiligen Dürreereignisse könnten dann unter Nutzung der Indexwerte von SPI-3/SPEI-3 hinsichtlich ihrer Dürreintensität bewertet werden (als Mittelwert oder Summe der Indexwerte innerhalb der jeweiligen Trockenperiode). Hier wird beispielhaft der Betrag der akkumulierten SPI-3/ SPEI-3-Werte als Maß für die Dürrestärke DM dieser Perioden angegeben. So werden z. B. für den Zeitraum 10/2011–12/2012 die Werte des $SPI_{\text{Okt-Nov-Dez } 2011}$ bis $SPI_{\text{Okt-Nov-Dez } 2012}$ aufsummiert (entspricht

13 Werten für einen 15-Monatszeitraum) – alternativ könnten auch die SPI-1-Werte von Oktober 2011 bis Dezember 2012 aufsummiert werden (dann hätte man für den 15-Monatszeitraum 15 Werte). Je größer der Wert, desto größer ist das während dieser Periode akkumulierte Feuchtedefizit. Mittels der Dezile bestimmte Trockenphasen mit einer Mindestdauer von 12 Monaten sind:

- 07/1961–09/1964 (39 Monate): $DM = 28,2/ 28,9$ ($DM_{\text{mon}} = 0,72/ 0,74$)
- 01/1972–03/1973 (15 Monate): $DM = 11,1/ 9,7$ ($DM_{\text{mon}} = 0,74/ 0,65$)
- 02/1976–03/1977 (14 Monate): $DM = 13,1/ 12,3$ ($DM_{\text{mon}} = 0,94/ 0,88$)
- 03/1990–01/1992 (23 Monate): $DM = 14,7/ 14,7$ ($DM_{\text{mon}} = 0,64/ 0,64$)
- 04/1992–06/1993 (15 Monate): $DM = 10,5/ 13,5$ ($DM_{\text{mon}} = 0,70/ 0,90$)
- 04/2000–03/2001 (12 Monate): $DM = 9,8/ 8,8$ ($DM_{\text{mon}} = 0,82/ 0,73$)
- 02/2003–10/2004 (21 Monate): $DM = 16,4/ 19,0$ ($DM_{\text{mon}} = 0,78/ 0,90$)
- 05/2006–04/2007 (12 Monate): $DM = 4,9/ 7,6$ ($DM_{\text{mon}} = 0,41/ 0,63$)
- 10/2011–12/2012 (15 Monate): $DM = 7,1/ 9,9$ ($DM_{\text{mon}} = 0,47/ 0,66$)

Die Dürrestärke hängt stark von der Dauer der Trockenphase ab, über die sich das Feuchtigkeitsdefizit aufbauen kann. Jedoch gibt es zum Teil auch erhebliche Unterschiede in der Dürrestärke zwischen Ereignissen (nahezu) gleicher Länge. So ist beispielsweise die Dürre 2000/01 als viel schwerwiegender zu bewerten als die von 2006/07 (jeweils 12 Monate) und die von 1976/77 war intensiver als die von 2011/12 (14 bzw. 15 Monate). Um die Dürren noch objektiver hinsichtlich ihrer Schwere bewerten zu können, könnte man anhand der Beziehung zwischen Dürrestärke und -dauer Normalwerte der Dürrestärke für entsprechende Andauern berechnen und dann die individuellen Ergebnisse einordnen. Hier wurde vereinfacht die Dürrestärke auf die Zahl der Monate pro Dürreereignis (DM_{mon}) heruntergerechnet. Dabei wird deutlich, dass die beiden jüngsten Dürren 2006/07 und 2011/12 als deutlich weniger schwerwiegend zu bewerten sind als die vorangegangenen. Daran ändert auch die Einbeziehung der Evapotranspiration durch den SPEI (jeweils 2. Wert) nicht allzu viel. Tendenziell ist die mittels SPEI bestimmte Dürrestärke etwas größer als die durch den SPI bestimmte. Als schwerste Dürren an der Station Dresden-Klotzsche zwischen 1961–2013 sind zum einen die extrem lang anhaltende (39 Monate) Dürre zu Beginn der 1960er-Jahre mit einer auch im Mittel recht großen Dürrestärke und zum anderen die mit 15 Monaten vergleichsweise kurze, jedoch sehr intensive Dürre 1976/77 einzuordnen.

SPI – SPEI – KWBA: Die Indizes, welche die Dürreintensität beschreiben, zeigen auf allen untersuchten Zeitskalen sehr gute Korrelationen. Der sehr ähnliche zeitliche Verlauf von SPI und SPEI bzw. KWBA (Abbildung 4 und Abbildung 5) zeigt, dass die zeitliche Variabilität des Niederschlags die Hauptantriebskraft für das Auftreten von Dürren im Freistaat Sachsen ist. Bei unzureichender Verfügbarkeit klimatologischer Daten kann somit der rein niederschlagsbasierte Index SPI als gute Näherung für den aktuellen Dürrezustand verwendet werden. Obwohl im Mittel die Übereinstimmungen sehr gut sind (Tabelle 14; im Mittel sind die Abweichungen zwischen SPI und SPEI gleich Null), treten in einigen Jahren doch erhebliche Abweichungen zwischen den Indexwerten auf, welche für praktische Anwendungen durchaus relevant sind. Als Schwellenwert für die Identifikation relevanter Abweichungen wurde hier $\pm 0,5$ gewählt, weil dies der Abstand von einer Dürrekategorie zur nächsten ist. Dieser Schwellenwert wird im Oktober und Dezember an der Station Dresden-Klotzsche nicht überschritten. Auch im November und Januar ist die Zahl signifikanter Abweichungen gering – jedoch sind die beobachteten negativen Abweichungen ungewöhnlich groß. Der März sowie der Juni bis September fallen durch eine große Zahl (≥ 3) signifikanter positiver Abweichungen auf – sprich die Dürre wird unter Einbeziehung der Evapotranspiration als schwerwiegender eingeschätzt. Im April und Mai ist die Zahl signifikanter positiver bzw. negativer SPI-SPEI-Differenzen mit jeweils zwei Ereignissen ausgewogen.

Tabelle 14: Charakterisierung der Abweichungen zwischen SPI und SPEI in den einzelnen Monaten an der Station Dresden-Klotzsche (1961-2013)

SPI – SPEI	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Mittlere Abweichung	-0,02	-0,03	0,05	-0,01	0,03	0,02	0,04	0,03	0,04	0,01	-0,05	0,00
Minimale Abweichung	-1,61	-0,96	-0,40	-1,82	-0,79	-0,58	-0,53	-0,42	-0,58	-0,31	-3,40	-0,17
Maximale Abweichung	0,26	0,49	0,81	0,60	0,55	0,64	0,79	0,55	0,63	0,45	0,31	0,24
Anz. Monate mit Abweichungen > 0,5	0	0	5	2	2	5	4	3	3	0	0	0
Anz. Monate mit Abweichungen < -0,5	1	3	0	2	2	3	1	0	1	0	1	0

Wie in Tabelle 14 dargestellt, kann der SPI die Dürreintensität sowohl über- als auch unterschätzen, je nachdem, ob die Evapotranspiration unter- oder überdurchschnittlich groß ausfällt. Diese Unterschiede sind in Abbildung 6 exemplarisch für die beiden Zeitabschnitte Januar 1962 bis Dezember 1966 (Lupe 1) und Januar 2005 bis Dezember 2009 (Lupe 2) dargestellt. In diesen Abbildungen wird deutlich, dass die Unterschiede in den Indexwerten erwartungsgemäß auf die Unterschiede in der Evapotranspiration zurückzuführen sind. Weil hier für die Berechnung der Evapotranspiration der Ansatz nach Turc-Wendling (DVWK 1996, 2002) verwendet wurde, der neben den Temperaturen auch die Sonnenscheindauer einbezieht, lassen sich die Abweichungen nicht allein durch die Temperaturanomalien erklären. Grundsätzlich zeigt bei negativen Evapotranspirationsanomalien (Temperaturanomalien) der SPI stärkere Dürreintensitäten an als SPEI oder KBWA. Umgekehrt führen positive Evapotranspirationsanomalien (und tendenziell auch Temperaturanomalien) zu größeren Dürreintensitäten bei den die Evapotranspiration einbeziehenden Indizes SPEI und KWBA.

Die Analyse der Korrelationen zwischen Temperaturanomalien und den Differenzen zwischen SPI- und SPEI-Werten zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Jahreszeit. In den Sommermonaten ist der Zusammenhang viel deutlicher ausgeprägt als in den Wintermonaten (Abbildung 7) und schon recht kleine Temperaturanomalien können zu recht großen Unterschieden zwischen SPI und SPEI führen. In den Monaten Januar, April, November werden die Korrelationen zudem durch einzelne extreme Werte zerstört. Dabei fällt auf, dass die negativen Differenzen zwischen SPI und SPEI – sprich der SPI zeigt intensivere Dürrewerte an als der SPEI – deutlich größer ausfallen als die positiven Differenzen. Die größten Differenzen zwischen SPI und SPEI werden in Tabelle 15 exemplarisch betrachtet und anderen Klimaparametern gegenübergestellt. Insgesamt wurden sieben Monate für die Betrachtung ausgewählt – vier mit Differenzen < -0,9 und drei > 0,7. Anhand der Beispielmonate wird deutlich, dass für sehr geringe Monatsniederschlagssummen wie z. B. 0,6 mm im November 2011, 1,2 mm im April 2007 und 1,9 mm im Januar 1996 extrem kleine SPI-Werte berechnet werden. In diesem Bereich scheint der SPI sehr sensitiv zu sein und die Größe der SPI-Werte ist nicht mehr sinnvoll zu interpretieren. Wichtig ist allein die Unterschreitung des Schwellenwertes für extreme Dürre von -2 und dieser Schwellenwert wird in allen drei genannten Monaten auch unter Verwendung des SPEI unterschritten, obwohl die Differenz zwischen SPI und SPEI zwischen -1,82 und -3,40 liegt.

Ist zusätzlich zu den geringen Niederschlagssummen auch die Verdunstung größer als normal, dann erreicht auch der SPEI sehr kleine Werte von < -2,8 und bei nahezu normalen Verdunstungswerten wie im Januar 1996 liegt der SPEI näher am Schwellenwert für extreme Dürren (SPI < -2,0). An den Werten in Tabelle 15 erkennt man zudem die Bedeutung der Einbeziehung weiterer Klimaparameter neben der Temperatur in die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration. So wird im Januar 1996 durch die positive Anomalie der Sonnenscheindauer die negative Temperaturanomalie ausgeglichen und die Verdunstungswerte sind nahe am Normalwert.

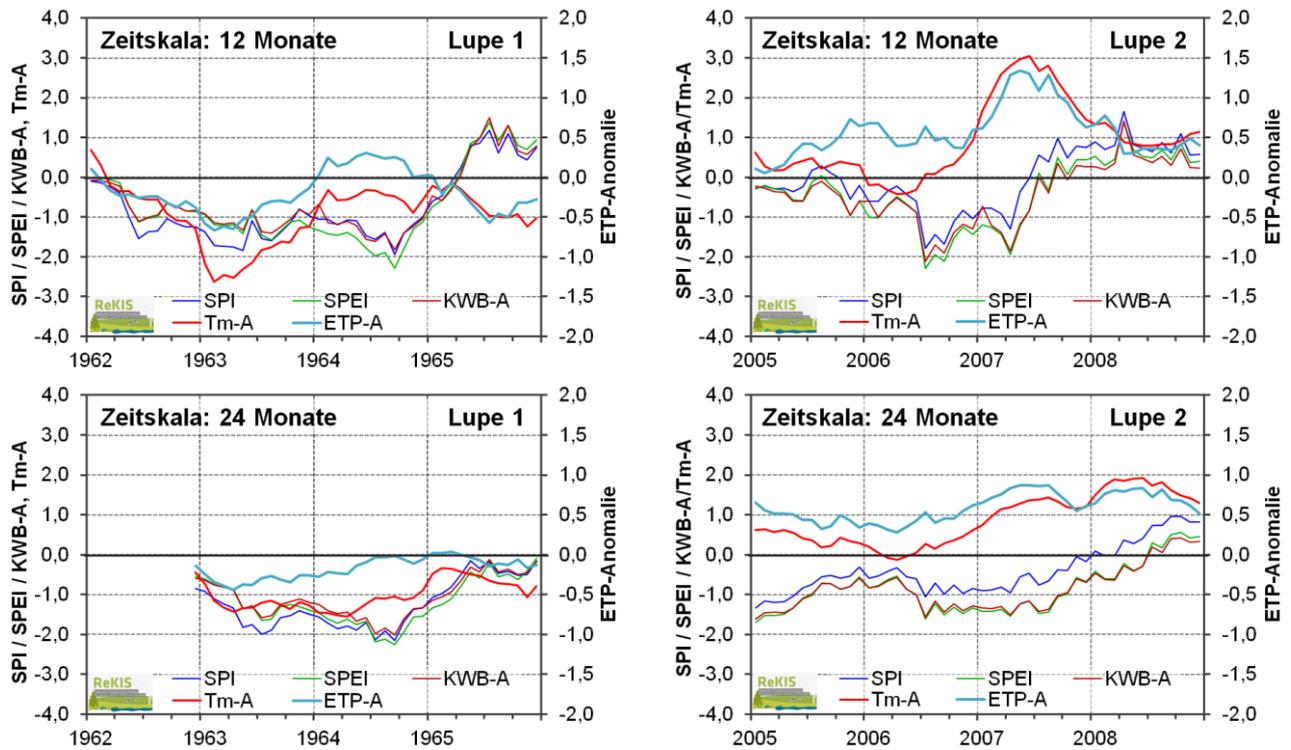


Abbildung 6: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der drei Feuchteanomalienindizes SPI, SPEI und KWB-A auf den Zeitskalen 12 (oben) und 24 (unten) Monate mit den über die gleichen Zeitabschnitte gemittelten Temperaturanomalien Tm-A und normierten Evapotranspirationsanomalien ETP-A in den Lupenzeitabschnitten 1 (01/1962–12/1966; links) und 2 (01/2005–12/2009; rechts)

Tabelle 15: Ungewöhnlich große Differenzen zwischen SPI-1 und SPEI-1 ($< -0,9$ und $> +0,7$) und zeitgleiche Werte der mittleren Tagestemperatur (T_m), der Monatsniederschlagssummen (P), der Sonnenscheindauer (SD) und der potenziellen Verdunstung (ETP) einschließlich der klimatologischen Mittelwerte für 1961–2000 (gekennzeichnet durch Überstrich)

Datum	SPI-1	SPEI-1	Δ (SPI-SPEI)	\bar{T} [°C]	T_m [°C]	\bar{P} [mm]	P [mm]	\overline{SD} [mm]	SD [h]	\overline{ETP} [mm]	ETP [mm]
Nov 2011	-6,32	-2,92	-3,40	4,3	4,9	61,1	0,6	58,6	158,3	16,9	27,0
Jan 1996	-3,75	-2,14	-1,61	-0,4	-4,0	56,8	1,9	57,9	96,4	13,1	13,7
Apr 2007	-4,62	-2,80	-1,82	8,3	11,8	57,1	1,2	57,1	150,5	61,3	91,5
Feb 1972	-2,80	-1,85	-0,96	0,7	2,4	49,4	8,5	75,9	82,6	20,0	21,6
Mrz 2011	-0,79	-1,55	+0,76	4,0	5,2	53,8	30,3	111,1	206,0	38,4	51,9
Jul 1994	-0,53	-1,32	+0,79	18,2	22,8	81,2	48,1	211,5	330,4	105,9	145,6
Mrz 2012	-1,34	-2,15	+0,81	4,0	7,1	53,8	20,9	111,1	174,5	38,4	52,2

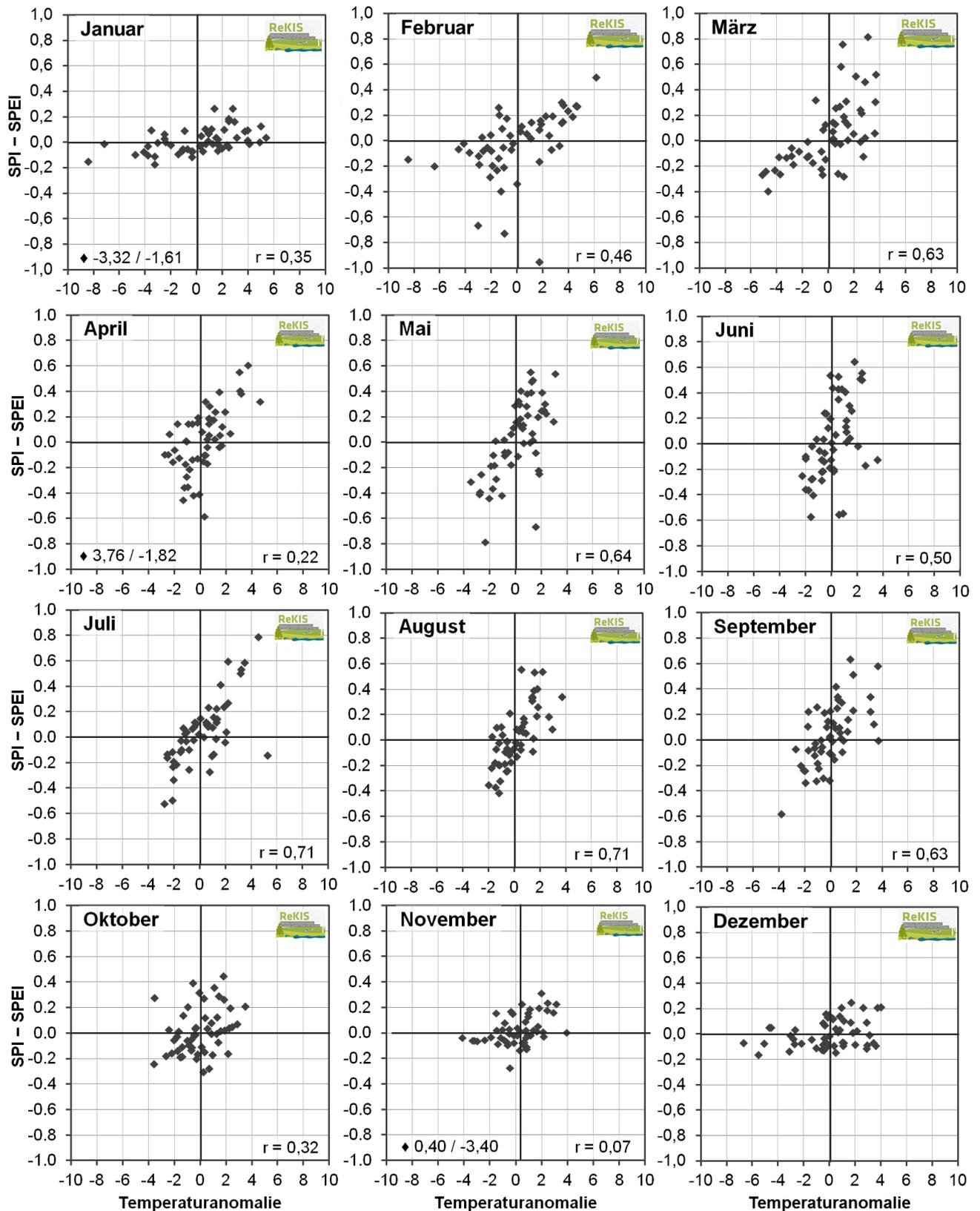


Abbildung 7: Scatterplots der Differenz zwischen SPI-1 und SPEI-1 gegenüber der Temperaturanomalie an der Station Dresden-Klotzsche inklusive Korrelationskoeffizienten nach Pearson; Zeitraum 1961–2013

Große positive Differenzen zwischen SPI und SPEI treten zumeist bei Niederschlagsdefiziten um 50 % auf – also deutlich ausgeprägtem Niederschlagsmangel, der jedoch nicht zu groß ist, um einen extrem negativen SPI-Wert hervorzurufen. Nun kann die positive Verdunstungsanomalie voll zum Tragen kommen und laut Niederschlagsverhältnissen milde ($-1,0 < \text{SPI} < -0,5$) bis moderate ($-1,5 < \text{SPI} < -1,0$) Dürren auf die Stufe moderater bis starker ($-2,0 < \text{SPI} < -1,5$) oder gar extremer ($\text{SPI} < -2,0$) Dürre heben.

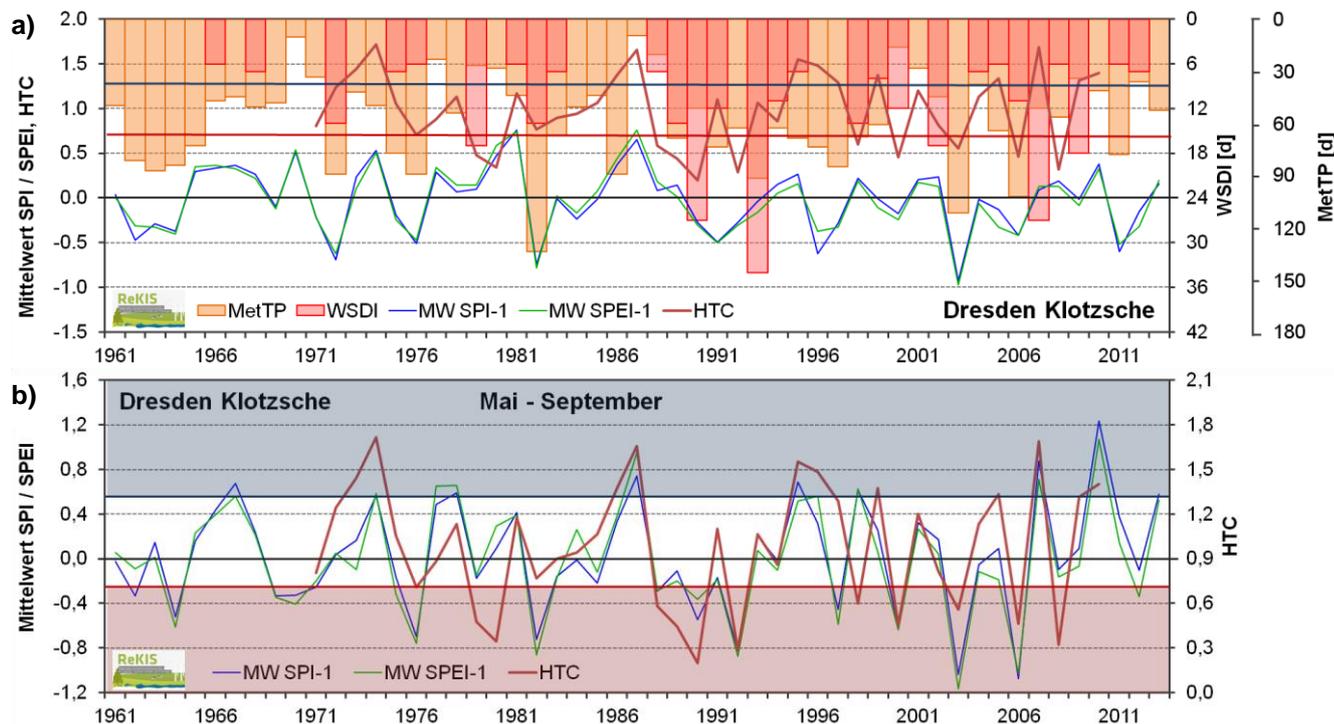


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der a) Jahreswerte (außer HTC) von metTP, WSDI, SPI-1, SPEI-1 und HTC und b) der SPI-1, SPEI-1 und HTC-Werte für den Zeitraum Mai bis Sept.; Station Dresden-Klotzsche

Zusätzlich zu den bisher vorgestellten Dürreindizes wurde auch der Hydrothermale Selyaninov-Koeffizient HTC beispielhaft für die Station Dresden betrachtet. Die vom Projekt KLAPS zur Verfügung gestellten Daten (MEHLER et al. 2014) decken den Zeitraum 1971–2010 ab. Der HTC wird nur für den Zeitraum, in denen die Temperaturen dauerhaft über 5 °C sind, berechnet und ist daher nicht direkt mit den auf Jahresbasis akkumulierten Indizes vergleichbar, was sich in Abbildung 8a zeigt. Die rote Linie (Fläche) in Abbildung 8 kennzeichnet den Schwellenwert (Bereich) unterhalb (innerhalb) dem die HTC-Werte sehr trockene Bedingungen anzeigen und die blaue Linie (Fläche) kennzeichnet analog die feuchten Bedingungen. Die SPI und SPEI-Werte können nicht direkt auf diese Linien (Flächen) bezogen werden und sind in Bezug auf die Nulllinie zu bewerten. Für eine bessere Vergleichbarkeit von SPI und SPEI mit dem HTC sind in Abbildung 8b die jeweiligen über die Monate Mai bis September (entspricht nahezu Vegetationsperiode I & II) gemittelten Werte gegenübergestellt. In diesem Zeitraum liegt der Großteil der Mittleren Lufttemperaturen an der Station Dresden-Klotzsche über 5 °C. Der direkte Vergleich ist dennoch schwierig, weil der HTC basierend auf Tageswerten berechnet wurde, welche andere Charakteristika wiedergegeben können als die auf Monatswerten basierenden Dürreindizes SPI und SPEI.

Der generelle Verlauf von SPI bzw. SPEI ähnelt dem des HTC und es werden Korrelationen von 0,67 und 0,59 erreicht. Dabei ist es erstaunlich, dass der HTC besser mit den SPI-Werten korreliert ist als mit den SPEI-Werten, obwohl HTC und SPEI beide die Temperaturen mit einbeziehen. Trotz des generell ähnlichen Verlaufs von HTC und SPI/SPEI ist die Identifikation von Dürrejahre durch die Indizes doch recht unterschiedlich. So wird beispielsweise die Vegetationsphase der Jahre 1979 und 1980 durch den HTC als sehr

trocken bewertet, während SPI und SPEI im Mittel nahezu normale Bedingungen anzeigen. Dies ist durch die Mittelung der Monatswerte von SPI und SPEI bedingt. Beide weisen in beiden Jahren im Mai deutlich negative Anomalien auf, welche durch die im Normalbereich liegenden positiven Anomalien der Folgemonate bzw. den zumeist sehr nassen September wieder aufgewogen werden. Für landwirtschaftliche Zwecke ist die Aussage von auf Monatswerten basierenden Indizes in vielen Fällen zu allgemein, weil nicht auf die sensitiven Entwicklungsphasen der jeweiligen Nutzpflanze eingegangen werden kann.

6.3 Bodenfeuchtemodellierungen mit METVER

Die mittels des Modells METVER simulierten Bodenfeuchtwerte (BÖTTCHER 2014b) – als Prozent der nutzbaren Feldkapazität (%nFk) – werden hier wiederum für die Station Dresden-Klotzsche exemplarisch vorgestellt und mit anderen Dürreindizes verglichen. Im Bereich der landwirtschaftlichen Beratung wird die Bodenfeuchte zumeist über die jeweilige Vegetationsperiode der Nutzpflanze hinweg betrachtet und interpretiert. Hier werden für den Vergleich zu den meteorologischen Dürreindizes SPI und SPEI die Monats- und Jahresmittelwerte der Bodenfeuchte ermittelt. Im Jahresdurchschnitt beträgt die Bodenfeuchte 73,5 % der nutzbaren Feldkapazität – in extremen Dürre Jahren kann sie auch auf im Mittel 50 % nFk absinken und in Nassjahren auch > 85 % erreichen. An der Station Görlitz liegen die Jahresmittelwerte durchschnittlich bei 76 % (47-88 %), in Wittenberg bei 65 % (37-79 %), in Chemnitz bei 80 % (62,5-92 %) und am Fichtelberg bei 88 % (73-96 %). Dabei ist zu beachten, dass die METVER-Simulationen für den Fichtelberg rein theoretische Werte sind, weil auf dem Fichtelberg ein Anbau von Winterweizen sehr unrealistisch ist.

Es wird deutlich, dass am Standort Dresden (nFK = 489 mm) die vergleichsweise simplen meteorologischen Dürreindizes in vielen Jahren eine sehr gute Übereinstimmung in der Beschreibung von Dürre Jahren mit den modellierten Bodenfeuchtwerte aufweisen (Abbildung 9). Jedoch sind vier mittels des SPI und SPEI bestimmte Dürre Jahre – nämlich 1972, 1996, 1997 und 2011 – hinsichtlich der mittleren Bodenfeuchte eher im Bereich normaler Jahre einzuordnen. Hier ist ein Blick auf die jeweiligen Monats- und Tageswerte notwendig, um die (landwirtschaftliche) Dürrestärke genauer bewerten zu können. Dabei ist auch der generelle Jahresgang der Bodenfeuchte zu beachten – von nahezu gesättigten Bodenverhältnissen im Winter über eine beginnende Entleerung der Bodenspeicher im Frühjahr bis zu den Minimalwerten am Ende des Sommers.

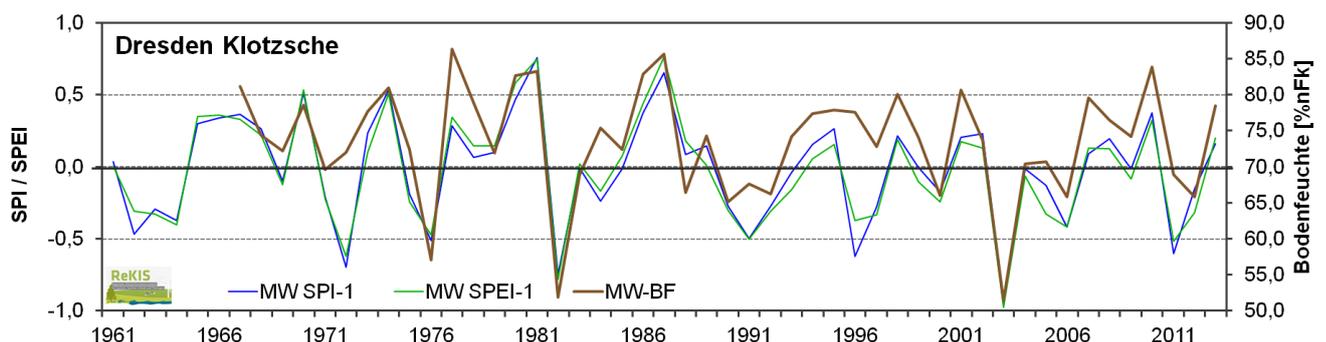


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte (aus Monats- bzw. Tageswerten gemittelte Werte) von SPI-1 und SPEI-1 sowie der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierte Bodenfeuchte (BF in % der nutzbaren Feldkapazität nFK) am Standort Dresden-Klotzsche im Zeitraum 1961–2013

In den meisten Monaten zeigen die Monatsmittelwerte der Bodenfeuchte gute Korrelationen zu den Monatswerten des SPI (Abbildung 10) und SPEI, was recht erstaunlich ist, weil die Bodenfeuchtwerte des aktuellen Monats von denen der Vormonate abhängen. Die Korrelationen dürften noch deutlich besser werden, wenn nicht das Monatsmittel der Bodenfeuchte, sondern die mittlere Änderung der Bodenfeuchte zum Vormonat betrachtet wird. Anhand der Gegenüberstellung von Monatsmittelwerten der Bodenfeuchte und dem SPI-1 in Abbildung 10 wird zum einen der typische Wertebereich der Bodenfeuchte in den einzelnen Monaten deutlich und zum anderen die Sensitivität der Bodenfeuchtwerte gegenüber den Niederschlagsbedingungen (angenähert durch den SPI-1). So liegt die Bodenfeuchte in den Wintermonaten zumeist zwischen 90 und 100 % der nutzbaren Feldkapazität – auch stark ausgeprägte Niederschlagsdefizite wirken sich kaum auf die Bodenspeicher aus. In den Frühjahrsmonaten sinkt die Bodenfeuchte dann – bedingt durch die steigende Evapotranspiration – ab und erreicht die geringsten Werte von Juli bis September. Danach werden die Wasserspeicher langsam wieder aufgefüllt.

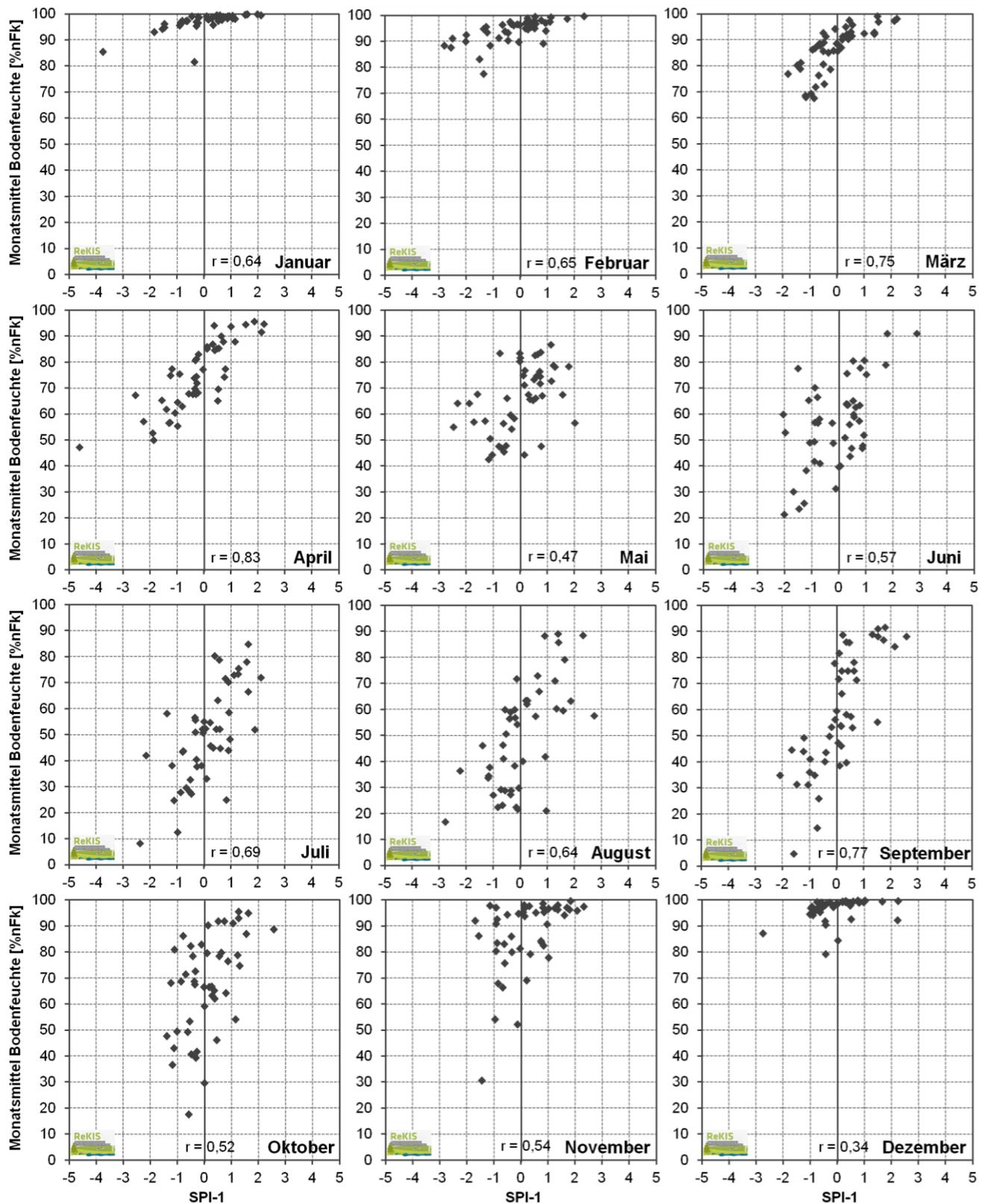


Abbildung 10: Korrelation der Monatswerte von SPI mit denen der Bodenfeuchte (als Feldkapazität Fk in % der nutzbaren Feldkapazität), Standort: Dresden-Klotzsche, Zeitraum: 1967–2013

Am größten sind die Korrelationen zwischen Bodenfeuchte und Niederschlag im März, April und September. In diesen Monaten scheint die Bodenfeuchte sehr direkt auf das Feuchtigkeitsdargebot zu reagieren und weniger stark von den Vorbedingungen abzuhängen als in den anderen Monaten. In die Monate März und April fällt meist der steile Abfall der Bodenfeuchte. Im September bleiben bei weiterhin vorherrschendem Niederschlagsdefizit auch die Speicher weiterhin entleert, welche beim Auftreten von Niederschlägen zumeist recht schnell wieder gefüllt werden. In den Sommermonaten bewirken dagegen hohe Niederschlagssummen zumeist nur eine kurzfristige und vergleichsweise kleine Auffüllung der Bodenwasserspeicher.

Der Jahresgang der Bodenfeuchtwerte zeigt sich auch in Abbildung 11. Hier wird zudem sichtbar, in welchen Jahren die Bodenfeuchte in den Bereich der „Unterversorgung“ gerät und in welchen Jahren „Bodendürren“ (vgl. Tabelle 5) aufgetreten sind. An der Station Dresden-Klotzsche werden in fast allen Jahren Bodenfeuchtwerte erreicht, die auf eine zeitweise Unterversorgung des betrachteten Winterweizens hindeuten und in mehr als der Hälfte der Jahre sinkt die Bodenfeuchte auf unter 30 % der nutzbaren Feldkapazität, was auf „Bodendürre“ hindeutet. Die Bodenfeuchte ist sehr stark ortsabhängig (z. B. Klimatologie, Boden). So wird an der Station Wittenberg die Kategorie Bodendürren noch häufiger und landandauernder erreicht, während derartig geringe Bodenfeuchtwerte am Fichtelberg sehr selten beobachtet werden (Abbildung 11).

In Abbildung 11 wird auch deutlich, dass in Phasen gehäuftem Auftretens meteorologischer Trockenperioden die Bodenfeuchte geringere Werte erreicht als in Zeiträumen mit selten auftretenden Trockenperioden. Der Zusammenhang zwischen dem Timing des Auftretens von Trockenperioden im Jahresverlauf und dem Absinken der Bodenfeuchte ist in dieser zeitlichen Auflösung jedoch schwer sichtbar. Daher werden in Abbildung 12 und Abbildung 13 zwei ausgewählte Jahre genauer betrachtet.

In Abbildung 12 ist der Jahresgang der modellierten Bodenfeuchte im Dürrejahr 2003 an allen fünf Stationen gegenübergestellt. Dabei werden auch die meteorologischen Trockenperioden und Tagesniederschlagsereignisse $\geq 5/10/20$ mm dargestellt. Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die meteorologischen Trockenperioden Phasen des Rückgangs der Bodenfeuchte kennzeichnen, während größere Niederschläge zu einer Teilauffüllung der Speicher führen. Im Jahr 2003 führten mehrere in kurzer Folge zwischen Februar und Mai auftretende Trockenperioden zu einer raschen Entleerung der Bodenwasserspeicher, sodass an der Station Dresden-Klotzsche bereits im April die Bodenfeuchte das erste Mal in den Bereich der „Unterversorgung“ für den Winterweizen geriet. Durch eine weitere Trockenperiode Ende Mai/ Anfang Juni wurden die Bodenwasserspeicher bis in den Bereich der „Bodendürre“ hinein entleert. Einige Starkniederschlagsereignisse Ende Juli führten zu einer kurzfristigen Teilauffüllung der Bodenwasserspeicher bis in den Bereich der „optimalen Versorgung“. Eine weitere Trockenperiode Anfang August zehrte diese Reserven jedoch schnell wieder auf und bis Mitte Oktober waren die Bodenfeuchteverhältnisse wiederum im Bereich der Bodendürre. An den anderen Stationen zeigt sich im Jahr 2003 ein ähnlicher Verlauf der Bodenfeuchte. Die absoluten Werte und das Erreichen der Bodendürrekategorien unterschieden sich jedoch deutlich in Abhängigkeit von den jeweiligen klimatischen Gegebenheiten und vorliegenden Bodeneigenschaften (Bodenwasserspeicherfähigkeit der Böden). Der Vergleich der verschiedenen Standorte zeigt zudem die unterschiedliche Häufigkeit von den basierend auf absoluten Schwellenwerten definierten meteorologischen Trockenperioden und Überschreitungstagen von 5, 10 und 20 mm Niederschlagshöhe. Diese Unterschiede wirken sich deutlich auf die ebenfalls als Absolutwert betrachtete Bodenfeuchte aus. In weiteren Untersuchungen wäre die Analyse relativer Bodenfeuchteanomalien möglich. Dies würde dann mehr der allgemeinen Dürredefinition als Abweichung vom Normalwert entsprechen, jedoch nicht mehr die tatsächlichen Dürrestresssituationen für die jeweils betrachtete Nutzpflanze anzeigen.

Als Beispiel für ein Jahr mit Dürreverhältnissen basierend auf der Bewertung von SPI-1 und SPEI-1-Werten, welches in Bezug auf die Bodenfeuchteverhältnisse als nahezu normal einzustufen ist, wird in Abbildung 13 das Jahr 1996 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in diesem Jahr die Trockenperioden größtenteils in das Winterhalbjahr fallen, wo eine Trockenheit aufgrund der geringen Evapotranspiration nur geringe Auswirkungen auf die Füllung der Bodenwasserspeicher hat. So sinkt die Bodenfeuchte während der lang andauernden Trockenheit im Januar und Februar des Jahres 1996 nur auf ca. 70–80 % der nutzbaren Feldkapazität. Eine ähnlich lang andauernde Trockenphase im Frühjahr oder Sommer hätte verheerende Folgen im Hinblick auf die Wasserverfügbarkeit für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und sicherlich auch für die natürliche Vegetation. In den Bereich der für den Winterweizen kritischen Feuchteversorgung kommen die Bodenfeuchtwerte im Jahr 1996 an den meisten der betrachteten Standorte nur für kurze Zeiträume. Nur an der Station Wittenberg werden langfristig (April bis September) Bodenfeuchtwerte im Bereich der „Unterversorgung“ modelliert, wobei die Bodenfeuchte in den Sommermonaten mehrfach unter 30 % der nutzbaren Feldkapazität absinkt.

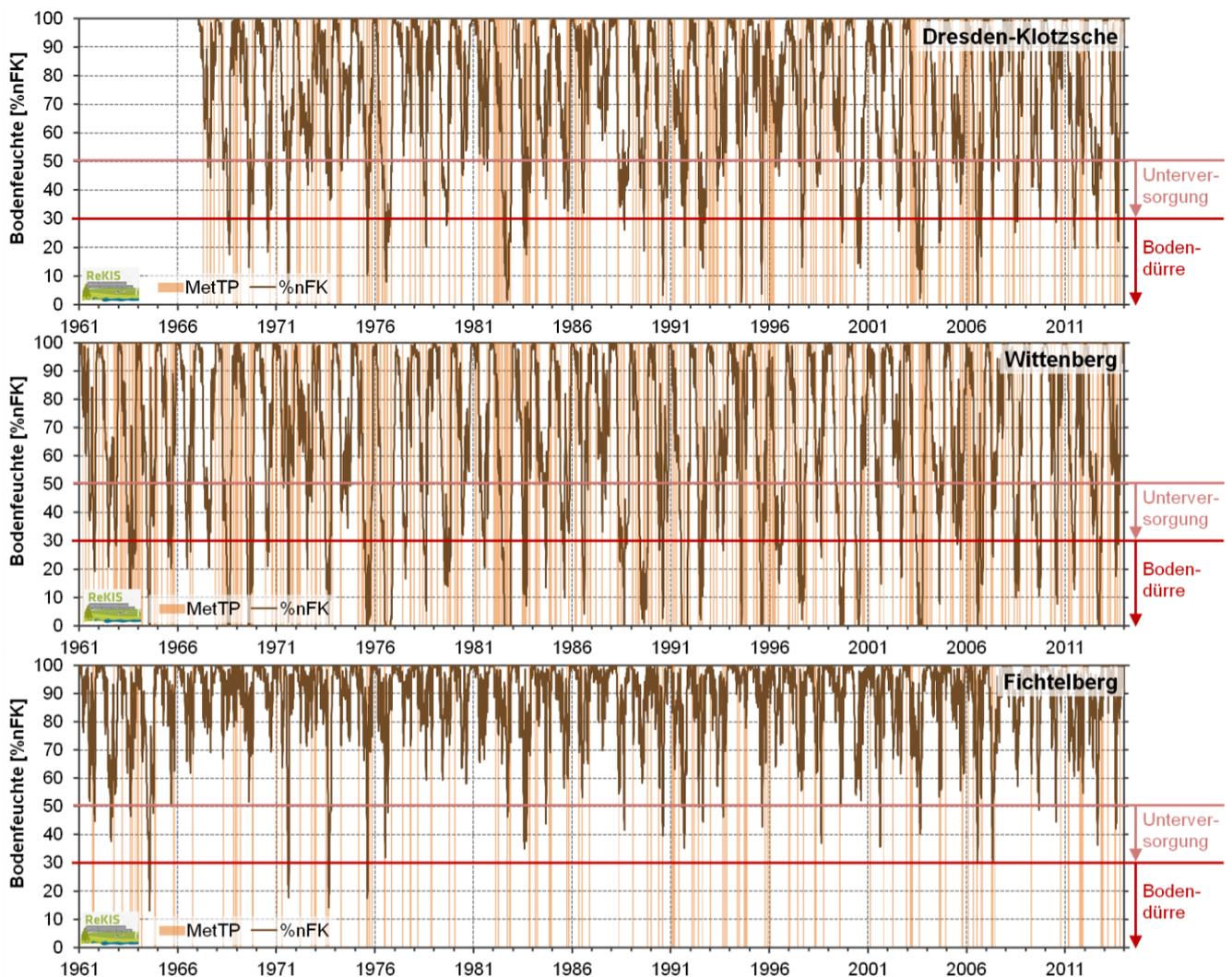


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Bodenfeuchte (als Prozent der nutzbaren Feldkapazität %nFK) an den Stationen Dresden-Klotzsche, Wittenberg und Fichtelberg in täglicher Auflösung und Vergleich mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP); Zeitraum 1967–2013

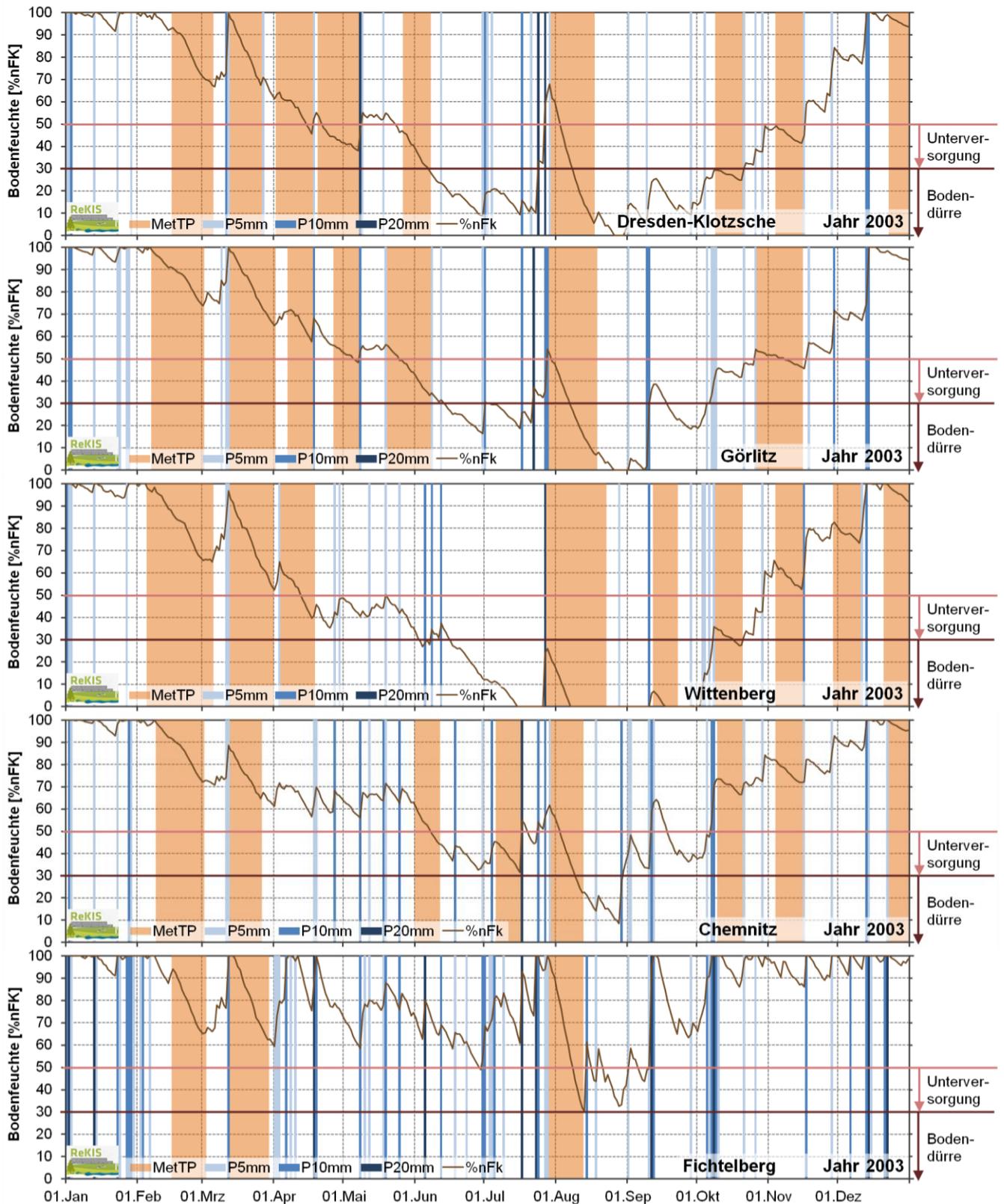


Abbildung 12: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierten Bodenfeuchte (in %nFk) im Trockenjahr 2003 an den Standorten Dresden-Klotzsche, Görlitz, Wittenberg, Chemnitz und Fichtelberg mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) und Tagen mit mind. 5 (P5mm), 10 (P10mm) bzw. 20 mm (P20mm) Niederschlagshöhe

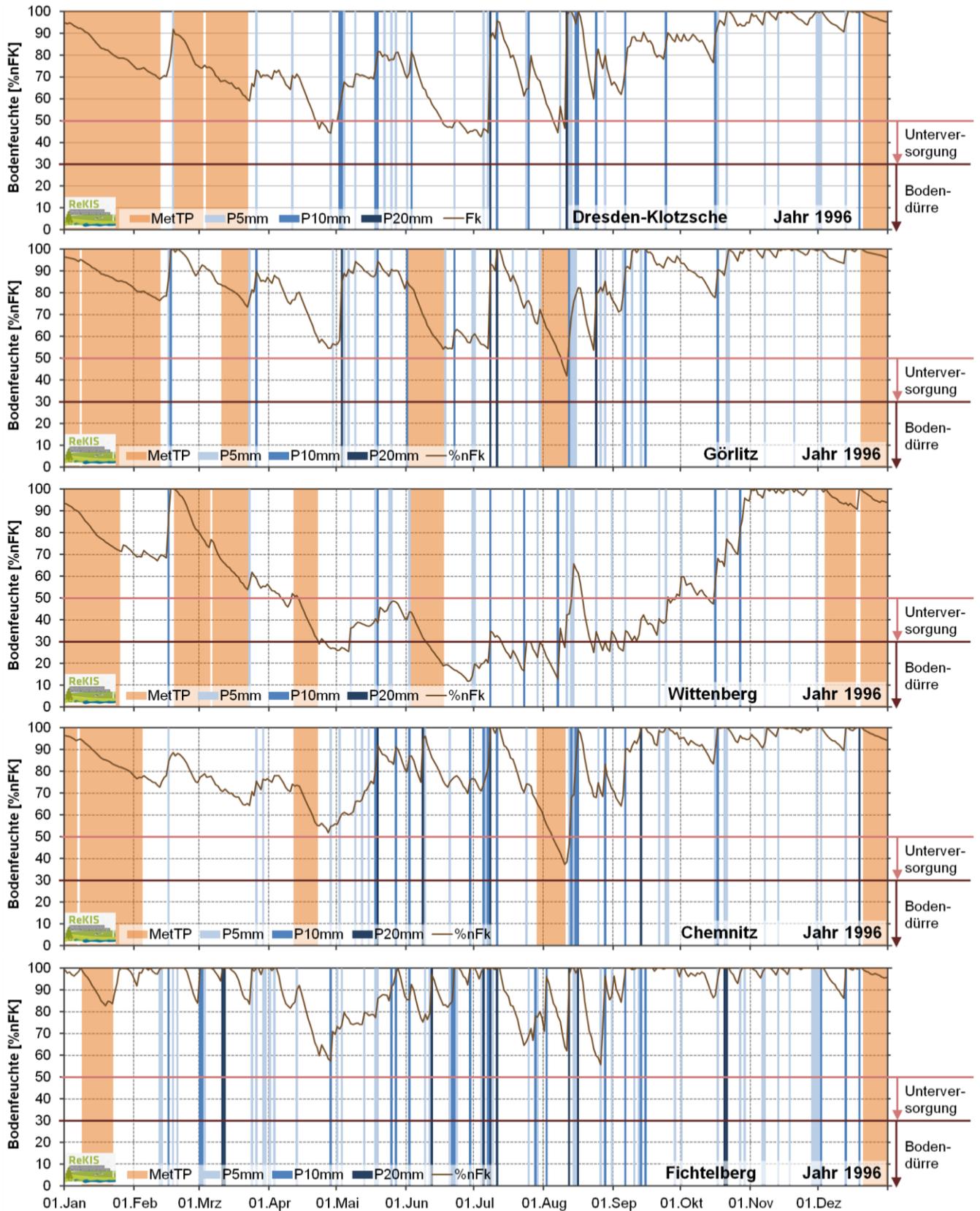


Abbildung 13: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierten Bodenfeuchte (in %nFK) im Trockenjahr 1996 an den Standorten Dresden-Klotzsche, Görlitz, Wittenberg, Chemnitz und Fichtelberg mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) und Tagen mit mind. 5 (P5mm), 10 (P10mm) bzw. 20 mm (P20mm) Niederschlagshöhe

6.4 Starkregen

Die Ergebnisse der Analyse von Starkregen werden perzentilweise für die Niederschlagsindizes R80p, R90p, R95p und R99p abgebildet. Die Ergebnisse für Starkregen R95p wurden bereits in der „Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen“ (BERNHOFER et al. 2015) veröffentlicht und werden im Folgenden um weitere Perzentile ergänzt. Für jedes Perzentil wird die entsprechende Regenmenge, die Überschreitungstage und die mittlere Intensität abgebildet sowie die Auftrittshäufigkeit für die Transekte und die Fläche Sachsens (Abbildung 14 bis Abbildung 25). Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt exemplarisch für Starkregen R80p. Für die anderen Perzentile werden die Änderungen gegenüber R80p aufgeführt. In Abbildung 19 bis 22 werden ausgewählte Ergebnisse perzentilübergreifend dargestellt.

Starkregen – Regenmenge

In Abbildung 14 ist die flächenhafte Verteilung von Starkregen R80p dargestellt. Deutlich ist die Zunahme der Regenmenge (Synonym für Regenhöhe) mit der Orografie zu erkennen und der Einfluss des Ost-West-Gradienten (Luv-Lee-Lage). Die maximalen Regenmengen treten folglich in den Kammlagen des Westerzgebirges auf. Dasselbe Verteilungsmuster ist für Starkregen R90p (Abbildung 17), Starkregen R95p (Abbildung 20) und für Starkregen R99p (Abbildung 23) zu erkennen.

Die Regenmengen von Starkregen R99p zeigen eine Verschiebung der Maxima von den Kammlagen ins Mittlere Bergland des Westerzgebirges. Eine nordwärts gerichtete Verschiebung höherer Regenmengen ist flächendeckend zu erkennen und betrifft das gesamte Erzgebirge, Zittauer Gebirge und die Lausitz. Im Tiefland (Leipziger Land und Heidefeld) fallen für R99p ebenfalls Regionen mit vergleichsweise höheren Regenmengen auf (Niveau unteres Bergland). Auffällig ist die Lage der Minima von R99p im Hügelland (Nordsächsisches Platten- und Hügelland und Mittelsächsisches Hügelland). Der stringente Höhengradient bei R80p bis R95p wird abgeschwächt bei R99p. Dies deutet auf einen entscheidenden Einfluss der Entstehungsmechanismen solcher starken, wahrscheinlich konvektiven Ereignisse hin. Der Box-Whisker-Plot in Abbildung 26 verdeutlicht die Häufigkeitsverteilung der Regenmengen jedes Perzentils. Erkennbar werden die Zunahme der Bandbreite der Regenmenge mit Höhe des Perzentils (sowohl Box als auch Whisker) sowie die zahlreichen Ausreißer, sprich sehr großen Regenmengen, beim 99. Perzentil.

Starkregen – Überschreitungstage

Die Überschreitungstage sind für die Referenzperiode 1961–1990 und die aktuelle Klimanormalperiode 1981–2010 kumulativ angegeben und können mittels Tabelle 16 in eine durchschnittliche Anzahl pro Jahr umgerechnet werden. Die Überschreitungstage von Starkregen R80p (Abbildung 14) zeigen ähnliche Verteilungsmuster wie die Regenmengen (analog für R90p in Abbildung 17, R95p in Abbildung 20 und R99p in Abbildung 23). Mit der Meereshöhe steigen die Regenmengen und die Anzahl der Starkregenereignisse. Von der Referenzperiode zur aktuellen Klimanormalperiode ist eine flächendeckende Zunahme der Überschreitungstage R80p zu erkennen (analog für alle anderen Perzentile). Für alle Perzentile fällt eine Zunahme der Überschreitungstage in Nordostsachsen, südöstlich von Leipzig, im Hügelland, im Bergland sowie in den Kammlagen auf. Bei den höheren Perzentilen weitete sich die Zunahme auf ganz Sachsen aus.

Das Verteilungsmuster der Zunahme und Abnahme von Überschreitungstagen R80p, R90p und R95p ist generell ähnlich. Für R99p ist es deutlich heterogener und kleinräumiger. Regionen mit deutlichen Zu- bzw. Abnahmen an Überschreitungstagen sind kleiner als bei anderen Perzentilen und liegen nahe beieinander. Der Box-Whisker-Plot (Abbildung 26) visualisiert die perzentilübergreifende Zunahme der Überschreitungstage. Je niedriger das Perzentil ist, desto höher ist die Bandbreite der Änderung der Überschreitungstage von Starkregen.

Tabelle 16: Anzahl der Überschreitungstage für Starkregen R80p, R90p, R95p und R99p für 30 Jahre kumulativ (d) und pro Jahr (d)

Überschreitungstage	kumulativ (d)	pro Jahr (d)
R80p	1050	35,0
	900	30,0
	750	25,0
	600	20,0
	540	18,0
R90p	480	16,0
	420	14,0
	360	12,0
	330	11,0
	300	10,0
R95p	270	9,0
	240	8,0
	210	7,0
	180	6,0
	150	5,0
R99p	75	2,5
	60	2,0
	45	1,5
	30	1,0

Starkregen – mittlere Intensität

Die mittlere Intensität eines Starkregenereignisses ist für R80p in Abbildung 14 für beide 30-jährigen Perioden visualisiert (analog für R90p in Abbildung 17, R95p in Abbildung 20 und R99p in Abbildung 23). Das Verteilungsmuster der mittleren Intensität eines Starkregenereignisses entspricht dem generellen Verteilungsmuster der Regenmengen in Sachsen. Flächendeckend sind leichte Zunahmen der mittleren Intensität für Starkregen R80p festzustellen. Deutlichere Zunahmen der mittleren Intensität für Starkregenereignisse R80p sind in den Kammlagen, vor allem im Bereich des Auerbergs, zu erkennen (R80p und R90p). Weitere Zunahmen sind im Mulde- und Lösshügelland, im Westlausitzer Berg- und Hügelland sowie in weiten Teilen der Lausitz festzustellen. Das Maximum der mittleren Intensität für Starkregenereignisse R80p und R90p befindet sich in den Kammlagen des Erzgebirges (Nähe Auersberg). Perzentilübergreifend wird deutlich, dass die Zunahme der mittleren Intensität von Starkregen R80p, R90p und R95p ca. 75 % der Fläche Sachsen erfasst (Abbildung 26). Die mittlere Intensität von Starkregen R99p ändert sich stärker, sowohl in den positiven als auch in den negativen Bereich. Im flächenmäßigen Mittel für Sachsen ist die Änderung jedoch geringer.

Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregen – Fläche

Die Änderungen der Auftrittshäufigkeiten AHfk von Starkregen der vier Perzentile in der Klimanormalperiode 1981-2010 gegenüber der Referenzperiode 1961–1990 wird für die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden in Abbildung 15, Abbildung 18, Abbildung 21 und Abbildung 24 dargestellt. Die Abbildungen enthalten zusätzlich den zugehörigen Box-Whisker-Plot.

Grundlage für die Berechnung der Auftrittshäufigkeit ist die Anzahl der Überschreitungstage im jeweiligen Bezugszeitraum. Eine ausreichend hohe Anzahl an Überschreitungstagen im jeweiligen Bezugszeitraum ist

die Voraussetzung für statistisch belastbare Aussagen. Die Anzahl der Überschreitungstage für die einzelnen Bezugszeiträume ist für Starkregen R99p in Tabelle 17 und für R95p in Tabelle 18 zusammengestellt. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs für Starkregen R99p sind die Ergebnisse der Auftrittshäufigkeit für die Jahreszeiten Frühling und Herbst von geringer statistischer Belastbarkeit. Für den Winter wird aufgrund des geringen Stichprobenumfangs keine Abbildung dargestellt.

Für den **Frühling** sind die Entwicklungen der Starkregenereignisse innerhalb Sachsens sehr heterogen. Eine abnehmende Tendenz kann für die Auftrittshäufigkeit von Starkregen R80p, R90p und R95p identifiziert werden. Dagegen sind Zunahmen und Abnahmen der Auftrittshäufigkeit von R99p flächenmäßig zu erkennen. In der Oberlausitz und in Südwestsachsen ist für alle Perzentile eine Abnahme der Auftrittshäufigkeiten von Starkregenereignissen festzustellen, am stärksten für R99p. Eine Zunahme von Starkregenereignissen zeigt sich am Erzgebirgskamm (am deutlichsten für R90 und R95p). Perzentilübergreifend fällt auf, dass Zentralsachsen von Zunahmen und Ost- und Westsachsen von Abnahmen betroffen ist. Des Weiteren steigt der positive und negative Änderungsbetrag mit zunehmendem Starkregen.

Im **Sommer** zeigt sich eine generelle Tendenz zur Zunahme der Starkregenereignisse in der gesamten Region und für alle Perzentile, wobei die Zunahme prozentual mit Höhe des Perzentils anwächst. Die stärksten Zunahmen liegen im Tiefland, zwischen Leipzig und der Vereinigung von Zwickauer und Freiburger Mulde. Deutliche Zunahmen gibt es weiterhin entlang des Erzgebirgskamms und in der östlichen Oberlausitz. Gebiete, in denen perzentilübergreifend die Auftrittshäufigkeiten abnehmen, sind die westlichen Ausläufer des Erzgebirges sowie des Vogtlands und Teile Nordwestsachsens. Die Auftrittshäufigkeit von Starkregen R99p zeigt punktuell starke Abnahmen im Bergland und den Kammlagen des Erzgebirges.

Im **Herbst** zeigen die Perzentile verschiedene Tendenzen. Die Auftrittshäufigkeit von Starkregen R80p zeigt flächig geringe Zunahmen, für R90p sind Zu- und Abnahmen flächenmäßig ausgewogen, für R95p und R99p sind Abnahmen festzustellen. Erwähnenswert sind die deutlichen Zunahmen an Starkregenereignissen R95p westlich der Elbe sowie deutliche Abnahmen östlich der Elbe. Diese Zweiteilung der Entwicklung in Sachsen ist etwas weniger stark ausgeprägt auch für die Auftrittshäufigkeit von R80p und R90p zu erkennen. Für R99p sind starke Abnahmen auf beiden Seiten der Elbe festzustellen; die Zunahmen beschränken sich im Wesentlichen auf Südwestsachsen. Punktuell wurden Zunahmen von über 600 % identifiziert. Solch große Zuwächse können bei sehr geringen Häufigkeiten entstehen. Es sei hier noch einmal auf die geringe statistische Belastbarkeit von R99p hingewiesen!

Die Entwicklung der Auftrittshäufigkeit von Starkregenereignissen im **Winter** ist stark heterogen. Die sehr kleinräumigen Veränderungen weisen eine starke Amplitude ($\pm 50\%$) auf. Für Starkregen R80p und R90p sind die Entwicklungen vergleichsweise großräumiger. R99p wird nicht dargestellt, weil zu wenige Ereignisse für die Analyse zur Verfügung standen. Perzentilübergreifend nehmen in Südwestsachsen die Auftrittshäufigkeiten von Starkregenereignissen ab, wohingegen sie in Zentral- und Nordwestsachsen sowie am Erzgebirgskamm größtenteils zunehmen.

In **Vegetationsperiode I** ist nahezu flächendeckend eine Abnahme der Auftrittshäufigkeit von Starkregenereignissen R80p, R90p und R95p festzustellen. Für R99p beschränken sich die Abnahmen auf die Lausitz, auf Südwest- und Nordwestsachsen. Deutliche Zunahmen (teilweise über 100 %) wurden für Zentral- bis Westsachsen analysiert. Somit zeigen die Änderungen der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R99p ein von den anderen Perzentilen signifikant abweichendes Verteilungsmuster.

Vegetationsperiode II zeigt flächendeckend eine markante Zunahme der Auftrittshäufigkeit von Starkregenereignissen aller Perzentile. Perzentilübergreifend fallen starke Zunahmen in Nordostsachsen und im Großraum Leipzig auf. Des Weiteren sind starke Zunahmen für R99p in Westsachsen festzustellen. Geringe Änderungen sind für alle Perzentile im Großraum Dresden und im Vogtland zu erkennen. Für die Auftrittshäufigkeit von R99p sind vereinzelte kleinräumige Abnahmen verteilt über Sachsen zu identifizieren.

Tabelle 17: Anzahl der Überschreitungstage (d) (Minimum, Maximum und Durchschnitt) für Starkregen R99p der Pseudostationen Sachsens, Jahreszeiten und Vegetationsperioden

Zeitraum	Minimum	Maximum	Durchschnitt
Frühling	6	21	13
Sommer	23	69	44
Herbst	3	25	11
Winter	0	19	3
Vegetationsperiode I	12	38	23
Vegetationsperiode II	12	61	39

Tabelle 18: Anzahl der Überschreitungstage (d) (Minimum, Maximum und Durchschnitt) für Starkregen R95p der Pseudostationen Sachsens, Jahreszeiten und Vegetationsperioden

Zeitraum	Minimum	Maximum	Durchschnitt
Frühling	47	105	72
Sommer	113	198	152
Herbst	49	123	71
Winter	14	121	39
Vegetationsperiode I	70	129	99
Vegetationsperiode II	104	182	141

Die flächenhafte Verteilung der prozentualen Änderungen der Auftrittshäufigkeit von Starkregenereignissen ist perzentilübergreifend als Box-Whisker-Plot in Abbildung 27 dargestellt. Die für die Karten gemachten Ausführungen werden hiermit noch einmal untermauert. Besonders deutlich wird: je höher das Perzentil, desto höher ist die prozentuale Änderung der Auftrittshäufigkeit in den Bezugszeiträumen.

Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregen – Transekte

Der zeitliche Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkregen für die Transekte West-Ost und Nord-Süd ist für die vier Perzentile in Abbildung 16, Abbildung 19, Abbildung 22 und Abbildung 25 dargestellt. Das Transekt West-Ost zeigt den Verlauf von West nach Ost durch die Station Görlitz. Dieses Transekt ist aufgrund des Einflusses der Kontinentalität auf das Starkregenverhalten von besonderem Interesse. Das Transekt Nord-Süd repräsentiert die maximale Nord-Süd Ausdehnung Sachsens mit dem maximalen Höhenunterschied und verläuft von Nord nach Süd durch die Station Fichtelberg. Es umfasst alle vorhandenen naturräumlichen Haupteinheiten.

Die x-Achse zeigt in den Transektabbildungen den zeitlichen Verlauf der Änderung der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen an und die y-Achse den räumlichen Verlauf des jeweiligen Transekts. Für das Transekt Nord-Süd ist der Verlauf der y-Achse von oben (Norden) nach unten (Süden) zu interpretieren. Für das Transekt West-Ost geht der Verlauf von oben (Westen) nach unten (Osten). So zeigt beispielsweise im Transekt West-Ost der untere Rand den zeitlichen Verlauf der Auftrittshäufigkeit für Starkregenereignisse der

Region Görlitz. Generell ist – methodikbedingt – bei der Interpretation der Fokus auf den Verlauf der Auftrittshäufigkeit zu legen. Werte für einzelne Jahre dürfen nicht interpretiert werden.

Das **Transekt West-Ost** zeigt im **Sommer** der Referenzperiode eine deutliche Zweiteilung für R80p, R90p und R95p auf. Westlich der Elbe gibt es deutlich weniger Starkregenereignisse als östlich der Elbe. Diese Zweiteilung löst sich in der aktuellen Klimanormalperiode auf, d. h. in allen Perzentilen treten Starkregenereignisse im gesamten Transekt auf, darüber hinaus auch deutlich häufiger in den 1990er-Jahren. Lokale Maxima westlich der Elbe liegen im Bergbaurevier Südraum Leipzig und im Bereich der Dresdner Elbtalweitung. Östlich der Elbe liegen die lokalen Maxima im Westlausitzer Hügel- und Bergland sowie in der östlichen Oberlausitz. In der **Vegetationsperiode I** kann für R80p, R90p und R95p eine generelle Abnahme von Starkregenereignissen konstatiert werden, welche in der Oberlausitz am stärksten ist. Ab Mitte der 1960er- bis Anfang der 1970er-Jahre entwickelte sich ein West-Ost-Gradient. Ab der Jahrtausendwende kehrte sich dieser um. Für R99p ist die Umkehr der Gradienten weniger prägnant. In der **Vegetationsperiode II** ist für alle Perzentile eine deutliche Zunahme an Starkregenereignissen, wieder besonders stark in der Oberlausitz, zu identifizieren. Die regionalen Maxima gleichen denen im Sommer. In den Vegetationsperioden zeigt sich somit deutlich eine zeitliche Verschiebung der Häufung von Starkregenereignissen im Jahresverlauf.

Im **Transekt Nord-Süd** sind im **Sommer** erwartungsgemäß hohe Auftrittshäufigkeiten für alle Perzentile zu erkennen. In der Referenzperiode stellte sich für alle Perzentile ein Nord-Süd-Gradient ein, welcher in der aktuellen Klimanormalperiode für R95p und R99p deutlich schwächer ausgeprägt ist und für R80p und R90p bestehen bleibt. In der aktuellen Klimanormalperiode gibt es eine Zunahme an Starkregenereignissen. Die lokalen Maxima liegen für R80p in den Kammlagen des Erzgebirges, für R90p und R95p nördlicher im Bergland und für R99p im Hügelland. In der **Vegetationsperiode I** sind deutliche Abnahmen der Auftrittshäufigkeit von Starkregenereignissen für das gesamte Transekt für R80p, R90p und R95p festzustellen. Ein leichter Nord-Süd Gradient ist für R80p und R90p in der Referenzperiode erkennbar, der sich später abschwächt. In der **Vegetationsperiode II** kommt es zu deutlichen Zunahmen der Auftrittshäufigkeiten. Die Maxima liegen allesamt im mittleren und oberen Bergland, im Luv des Erzgebirges, sodass auch hier ein Nord-Süd-Gradient vorliegt.

Deutlich ist für alle Perzentile eine Variabilität in der zeitlichen Entwicklung (Periodizität) in den Transektgrafiken zu erkennen. Die Periodizität ist in allen betrachteten Bezugszeiträumen zu erkennen, jedoch in unterschiedlicher Ausprägung. In den Bezugszeiträumen mit den häufigsten Starkregenereignissen, Sommer und Vegetationsperiode II, zeigt sich die Periodizität besonders eindrücklich. Perioden mit hoher Starkregenhäufigkeit wechseln sich mit Perioden niedriger ab. Jedoch treten Perioden mit hoher Starkregenhäufigkeit nicht zwingend in allen Bezugszeiträumen gleichzeitig auf, d. h. Maxima bzw. Minima der Periodizität sind nicht auf bestimmte Jahre fixiert. Aufeinanderfolgende Jahreszeiten können sehr verschiedene Tendenzen der Periodizität zeigen. Insgesamt zeigen sich für R80p, R90p, R95p und R99p recht ähnliche Verläufe der Zu- und Abnahmen der Auftrittshäufigkeit von Starkregenereignissen

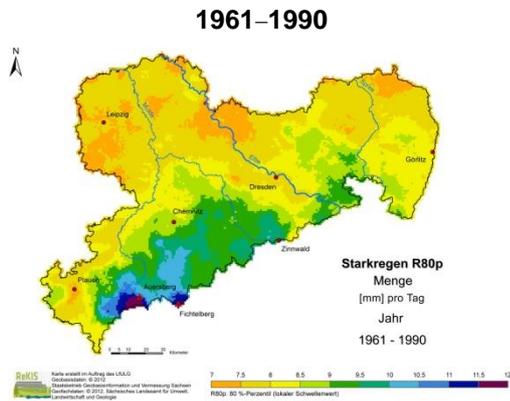
Um detailliertere Beschreibungen der Veränderung der Periodizität im Jahresverlauf zu ermöglichen, wäre eine an diese Fragestellung angepasste Parametrisierung des Verfahrens notwendig. Die auftretende Periodizität verdeutlicht, dass Veränderungen im Auftreten von Starkregenereignissen vor dem Hintergrund der natürlichen Variabilität des Niederschlags zu bewerten sind.

Perzentilübergreifende Zusammenfassung

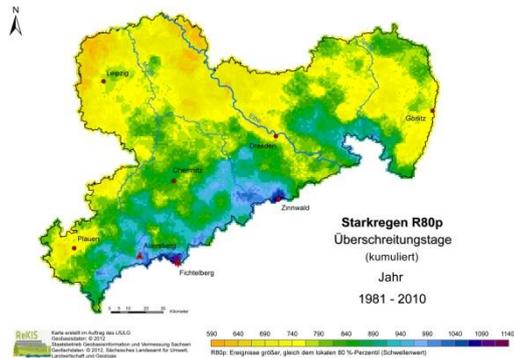
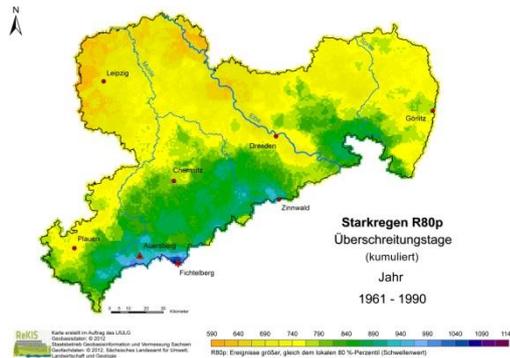
- Die flächenhafte Verteilung der Starkregensmengen R80p, R90p, R95p und R99p ist weitgehend ähnlich. Die Regensmengen nehmen mit der Orografie zu, werden vom Ost-West-Gradienten modifiziert (maximale Regensmengen in den Kammlagen des Westerzgebirges). Das räumliche Verteilungsmuster für Starkregen R99p zeigt eine Verschiebung der Maxima ins Mittlere Bergland und eine flächendeckende nordwärts gerichtete Verschiebung höherer Regensmengen. Der stringente Höhengradient bei R80p, R90p und R95p wird abgeschwächt bei R99p. Dies deutet auf einen entscheidenden Einfluss der Entstehungsmechanismen solcher starken, wahrscheinlich konvektiven Ereignisse hin. Der in den letzten Jahrzehnten beobachtete Temperaturanstieg bewirkt eine Zunahme von konvektiven Niederschlagsereignissen, insbesondere in den flacheren Regionen.
- Die Anzahl der Überschreitungstage von Starkregen R80p, R90p, R95p und R99p nimmt von der Referenzperiode (1961–1990) zur aktuellen Klimanormalperiode (1981–2010) flächendeckend zu. Für alle Perzentile fällt eine starke Zunahme der Überschreitungstage in Nordostsachsen und südöstlich von Leipzig auf. Bei den höheren Perzentilen weitete sich die Zunahme auf ganz Sachsen aus.
- Im Zeitraum 1961–2010 wurden Änderungen in der Auftrittshäufigkeit von Starkregen aller vier Perzentile insbesondere im Jahresverlauf (Jahreszeiten, Vegetationsperioden), festgestellt (Tabelle 19). In der Vegetationsperiode I hat die Anzahl der Regenereignisse der untersuchten Stärken abgenommen und in der Vegetationsperiode II zugenommen. Die prozentualen Änderungen der Auftrittshäufigkeit sind für die höheren Perzentile oft besonders ausgeprägt. Lediglich in Vegetationsperiode I ist für R99p kaum eine Änderung der Auftrittshäufigkeit zu erkennen.
- In Sachsen existieren im Auftreten von Starkregen horizontale (West-Ost, Nord-Süd) Gradienten, die im Jahres- und zeitlichen Verlauf sowie in den verschiedenen Starkregenindizes unterschiedlich ausgeprägt sind. Deckt sich der Nord-Süd-Gradient der Auftrittshäufigkeiten mit der Regenmenge und -intensität, so ist der Breitengradparallele Gradient der Auftrittshäufigkeiten teilweise entgegengesetzt dem Gradienten der Regenmenge und -intensität. Gehäuft vorkommende Vb-Wetterlagen in den letzten Jahren sorgten für ein vermehrtes Auftreten von Starkniederschlägen im Osten Sachsens.
- In den Sommermonaten ist eine Verschiebung der Maxima der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R80p bis R99p nordwärts (Kammlagen – Bergland – Hügelland) auf der gesamten Fläche Sachsens und auch in den Transekten zu beobachten. Dies deutet auf eine Zunahme konvektiv bedingter Starkregenereignisse, insbesondere in tieferen Lagen hin.
- Die räumlichen Verteilungsmuster von Starkregen und die Veränderungen zwischen den beiden Klimanormalperioden sind für alle betrachteten Perzentile weitgehend ähnlich. Geringe Abweichungen konnten für R95p festgestellt werden. Für das Verhalten von Starkregen R99p konnten für die Bezugszeiträume sowohl teilweise gleiche als auch gegenläufige Entwicklungen erkannt werden. Die Amplitude der Veränderungen ist deutlich höher als bei den niedrigen Perzentilen.
- Die markantesten Veränderungen fanden in Südwest-, Nordostsachsen, in den Kammlagen und im Großraum Leipzig statt.
- Die zeitliche Entwicklung der Auftrittshäufigkeit von Starkregen unterschiedlicher Stärke unterliegt in Sachsen im Zeitraum 1961–2010 einer Periodizität. Diese ist in den untersuchten Bezugszeiträumen nicht völlig identisch.

Tabelle 19: Prozentuale Änderung der Auftrittshäufigkeit (%) von Starkregenereignissen R80, R90p, R95p und R99p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden

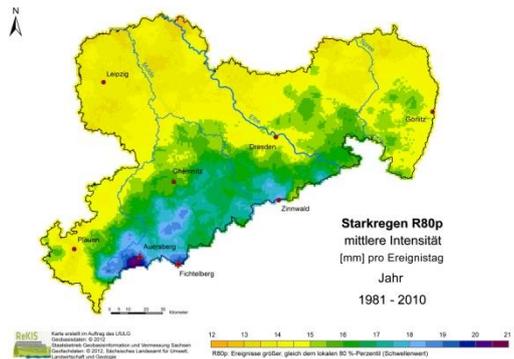
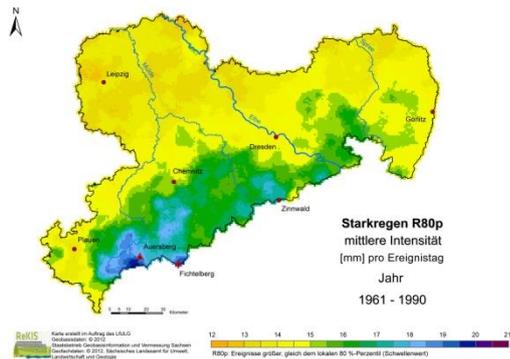




Starkregen R80p - Menge



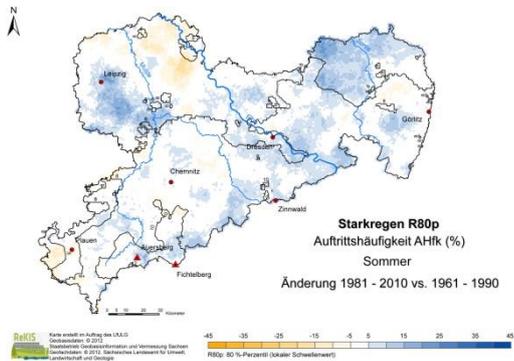
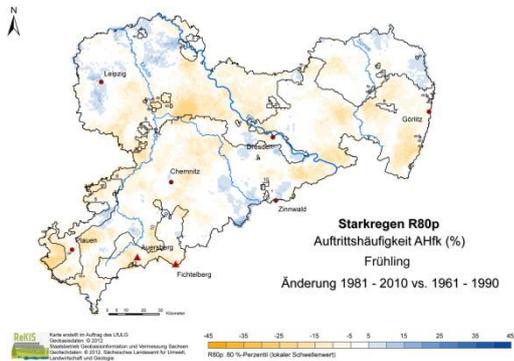
Starkregen R80p – Überschreitungstage (kumuliert)



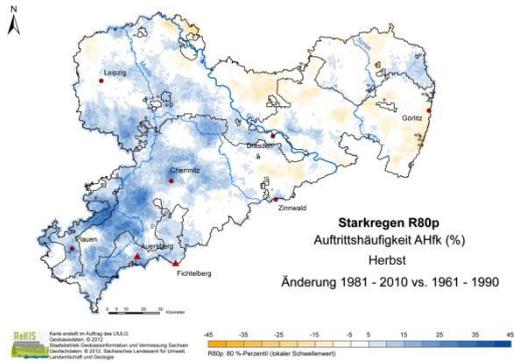
Starkregen R80p – mittlere Intensität

Abbildung 14: Flächenhafte Verteilung von Starkregen R80p in Sachsen für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010, Jahr: Regenmenge von Starkregen R80p (mm) (oben), kumulative Überschreitungstage von Starkregenereignissen R80p (d) (Mitte), mittlere Intensität pro Starkregenereignis R80p (mm/Ereignis) (unten)

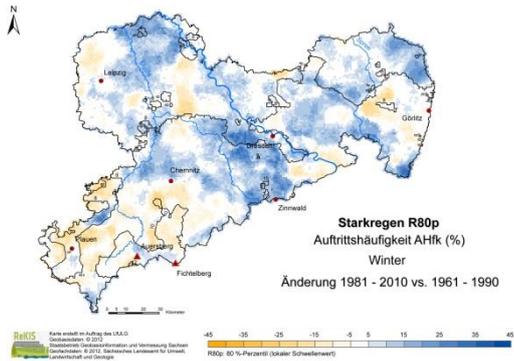
Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.



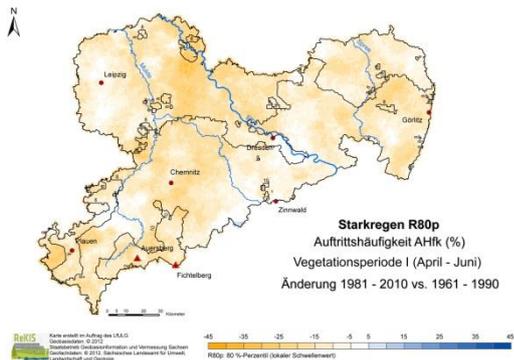
Frühling



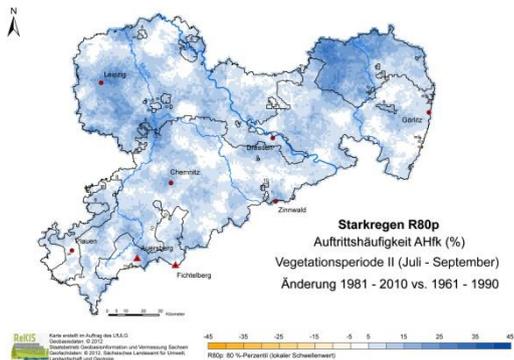
Sommer



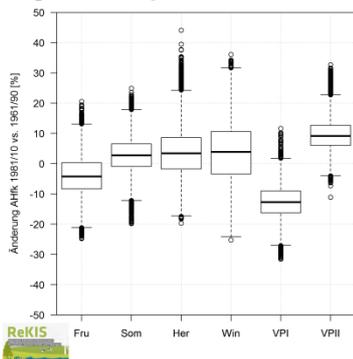
Herbst



Winter



Vegetationsperiode I

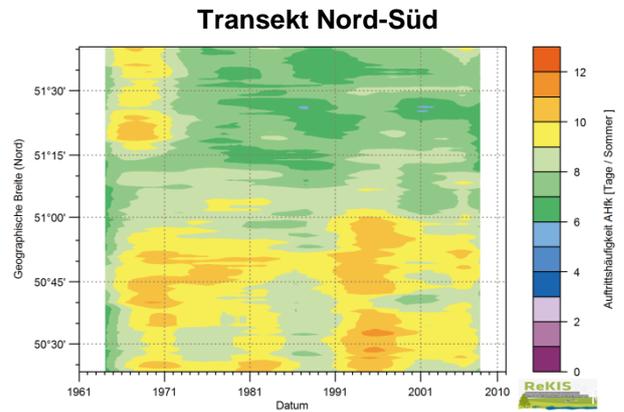
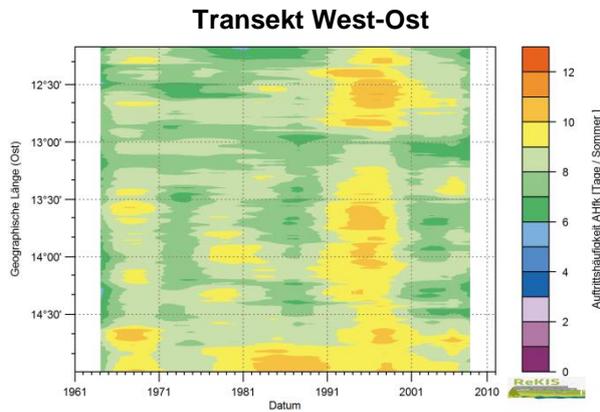


Vegetationsperiode II

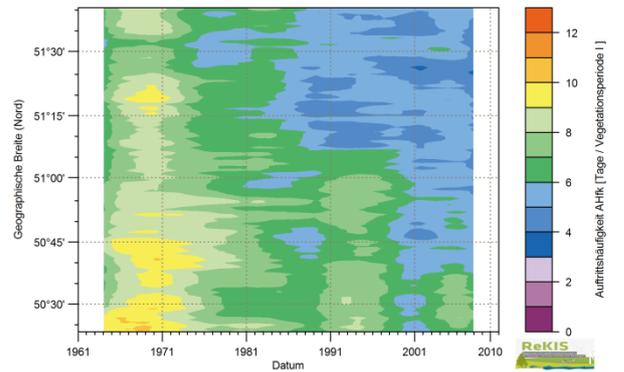
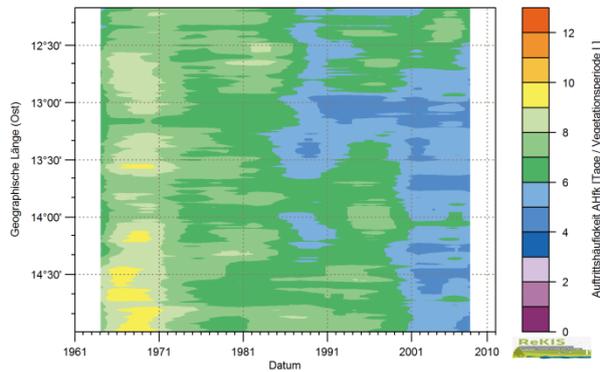
Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudo-stationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

Box-Whisker-Plot

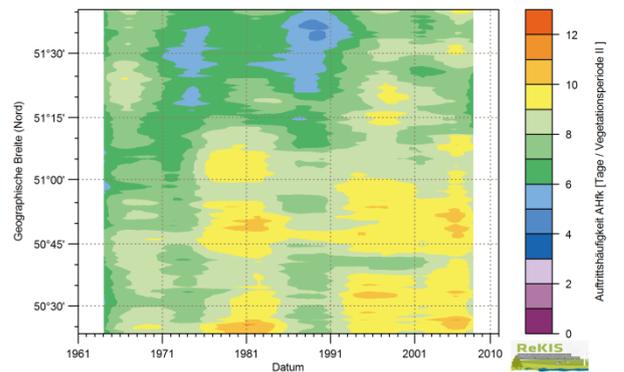
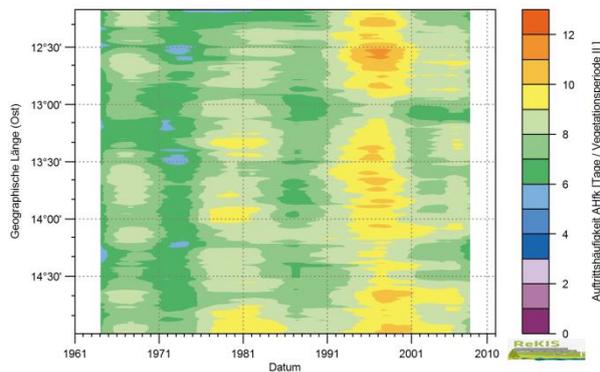
Abbildung 15: Flächenhafte Verteilung für die Änderung (%) der Auftretshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R80p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (Isolinien: Menge StarkregenR80p in mm); Box-Plot zu den flächenhaften Verteilungen



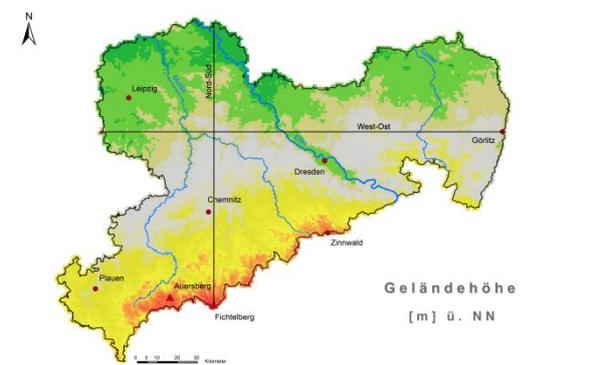
Sommer



Vegetationsperiode I (April-Juni)



Vegetationsperiode II (Juli-September)



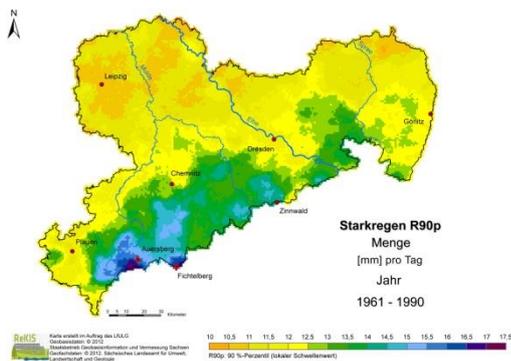
Lage der Transekte

Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

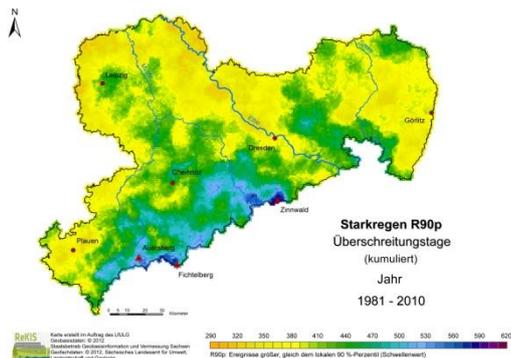
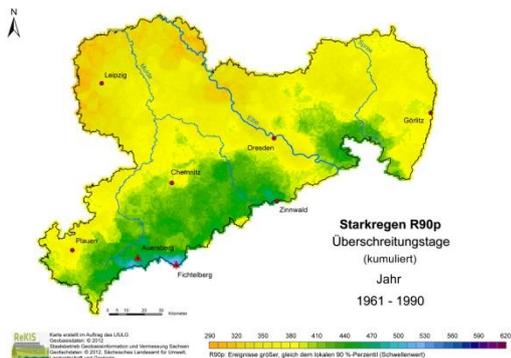
Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R80p für die Transekte West-Ost und Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte

1961–1990

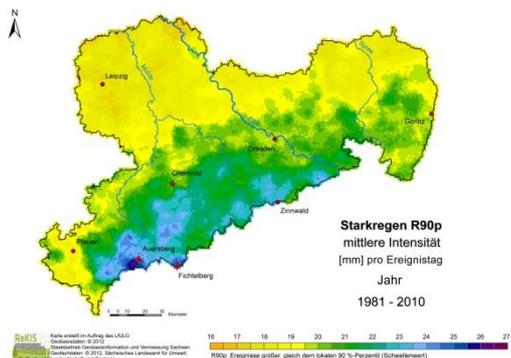
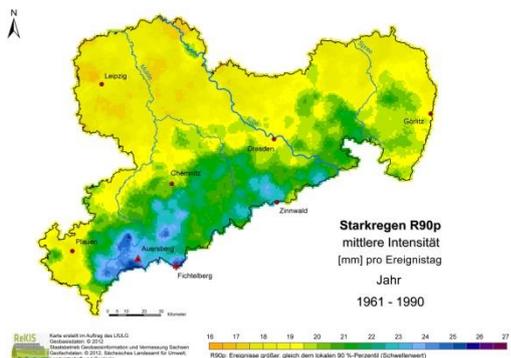
1981–2010



Starkregen R90p - Menge



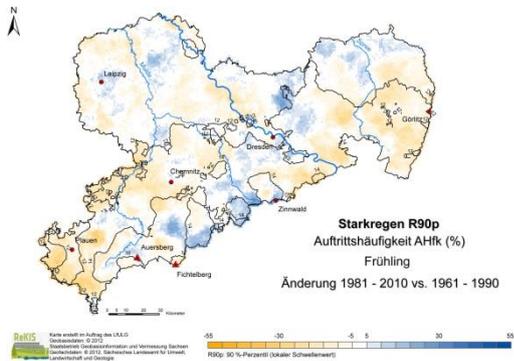
Starkregen R90p – Überschreitungstage (kumuliert)



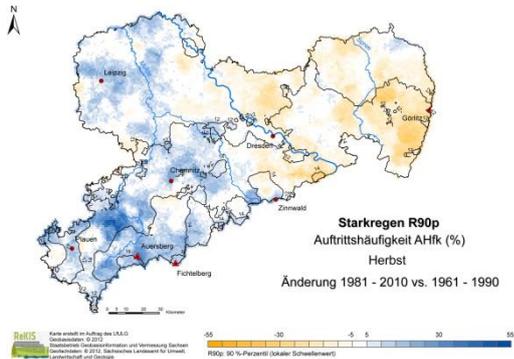
Starkregen R90p – mittlere Intensität

Abbildung 17: Flächenhafte Verteilung von Starkregen R90p in Sachsen für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010, Jahr: Regenmenge von Starkregen R90p (mm) (oben), kumulative Überschreitungstage von Starkregenereignissen R90p (d) (Mitte), mittlere Intensität pro Starkregenereignis R90p (mm/Ereignis) (unten)

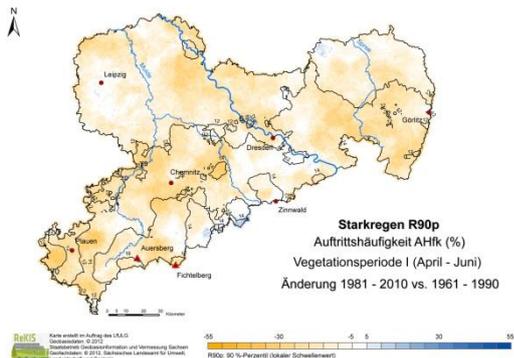
Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.



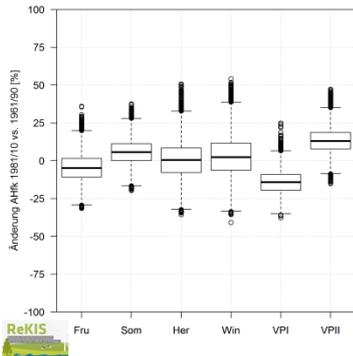
Frühling



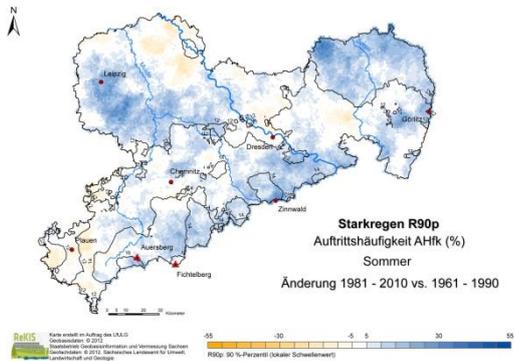
Herbst



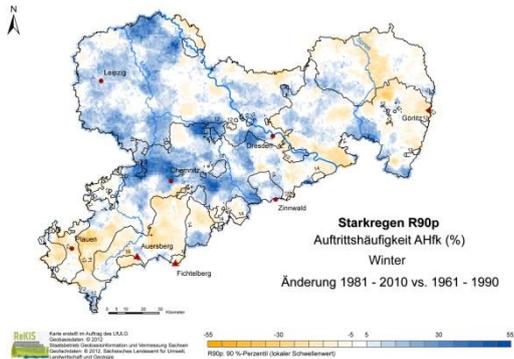
Vegetationsperiode I



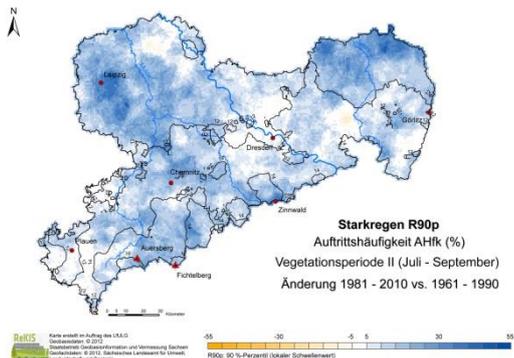
Box-Whisker-Plot



Sommer



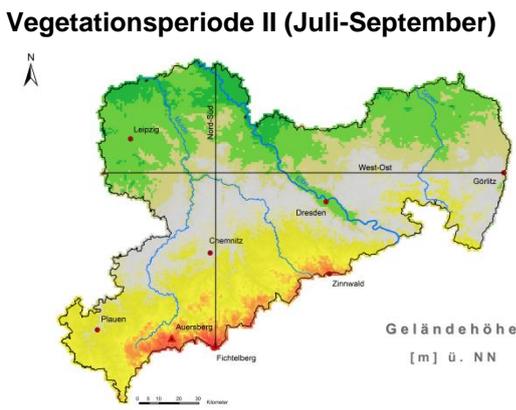
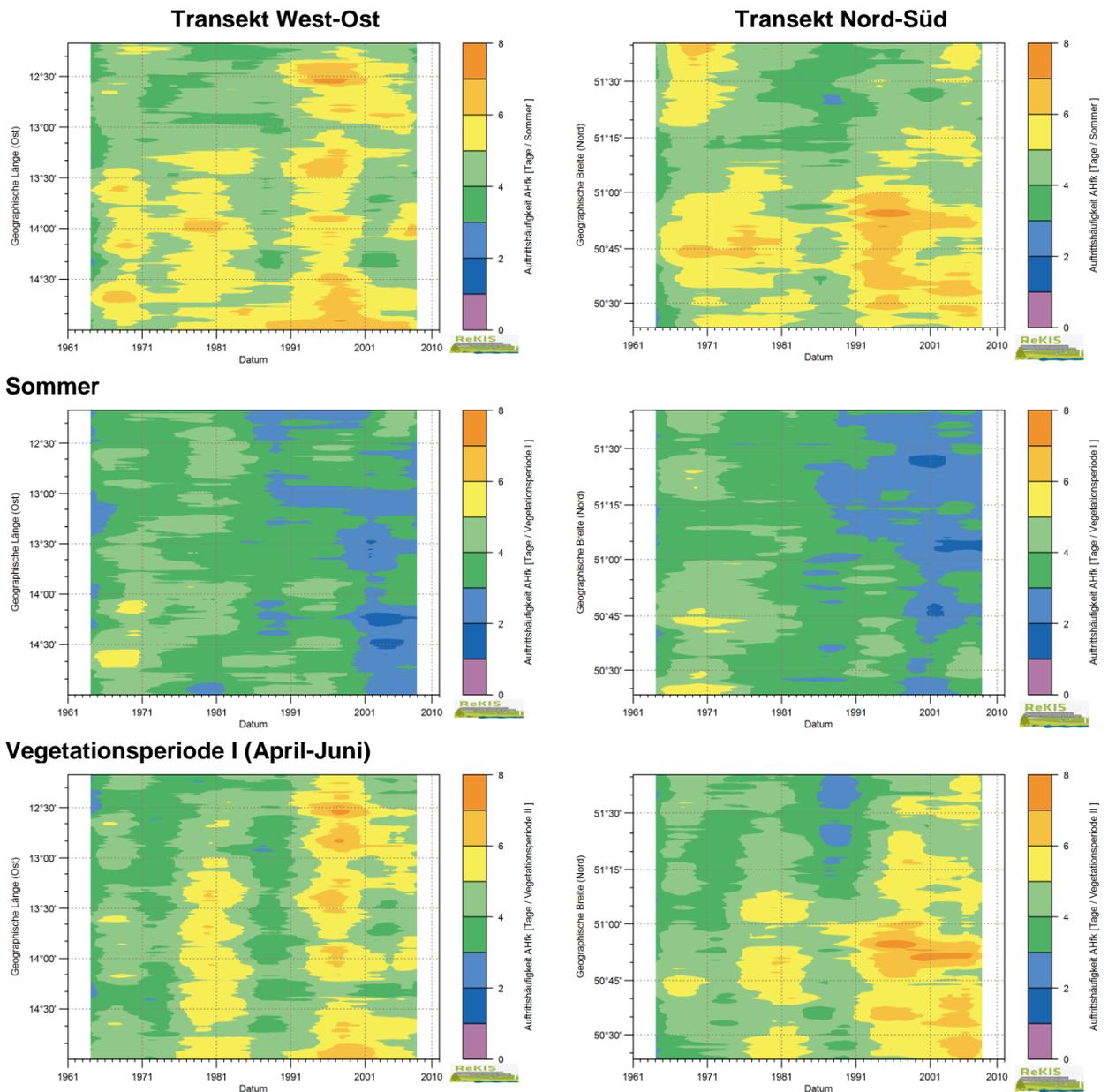
Winter



Vegetationsperiode II

Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudo-stationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

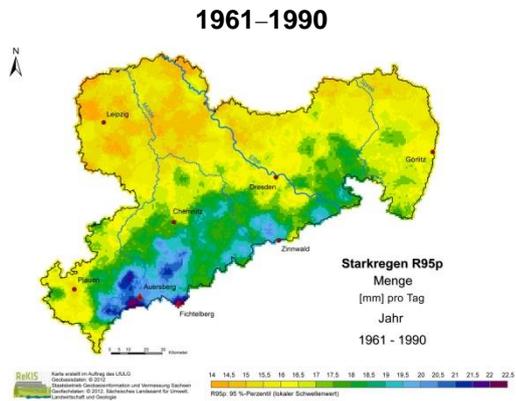
Abbildung 18: Flächenhafte Verteilung für die Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R90p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (Isolinien: Menge Starkregen R90p in mm); Box-Plot zu den flächenhaften Verteilungen



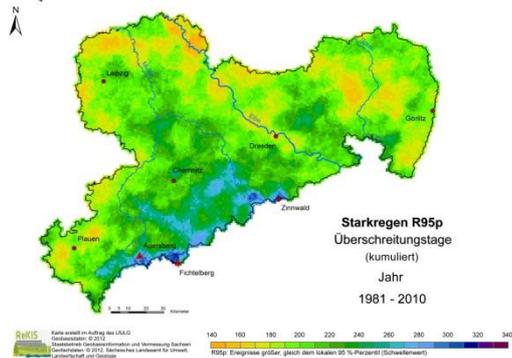
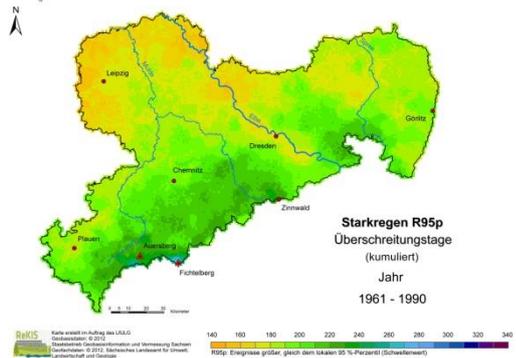
Lage der Transekte

Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

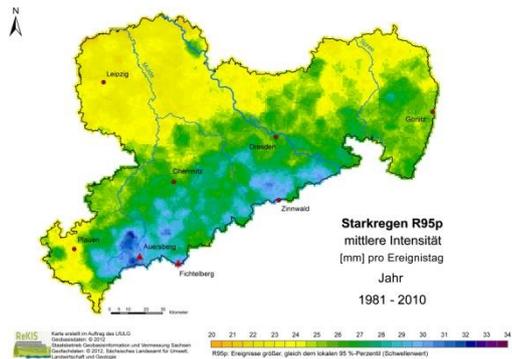
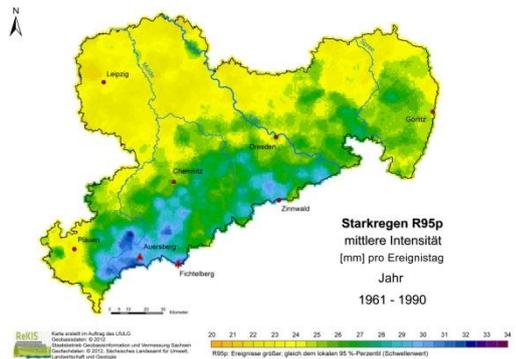
Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R90p für die Transekte West-Ost und Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte



Starkregen R95p - Menge



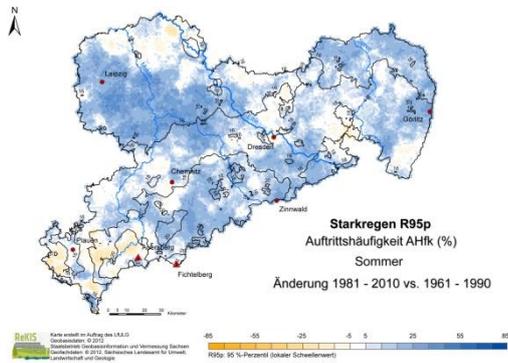
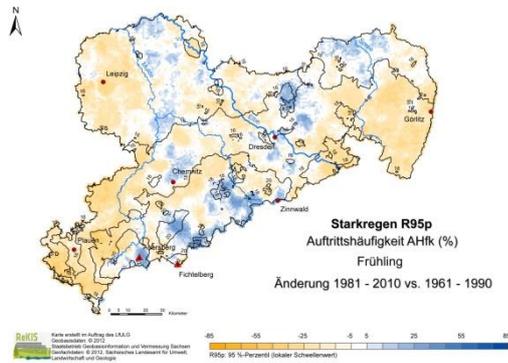
Starkregen R95p – Überschreitungstage (kumuliert)



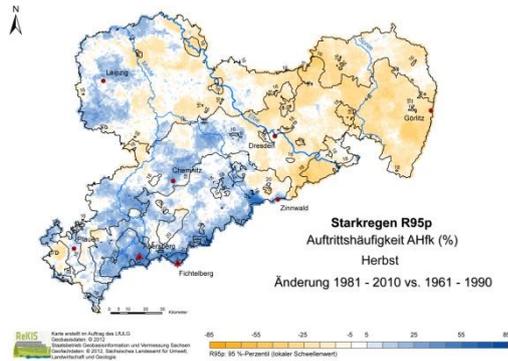
Starkregen R95p – mittlere Intensität

Abbildung 20: Flächenhafte Verteilung von Starkregen R95p in Sachsen für die Klimanormalperioden 1961–1990 und 1981–2010, Jahr: Regenmenge von Starkregen R95p (mm) (oben), kumulative Überschreitungstage von Starkregenereignissen R95p (d) (Mitte), mittlere Intensität pro Starkregenereignis R95p (mm/Ereignis) (unten)

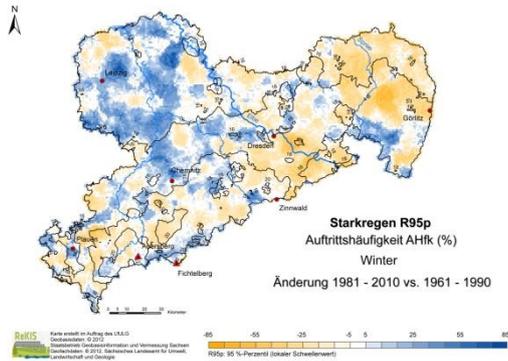
Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.



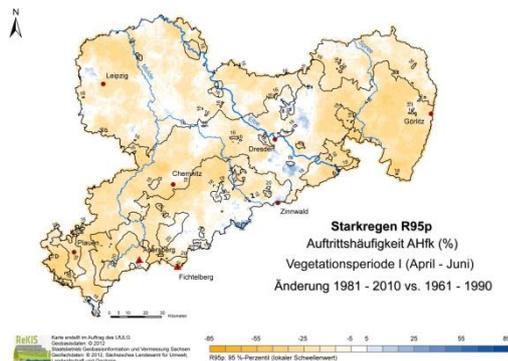
Frühling



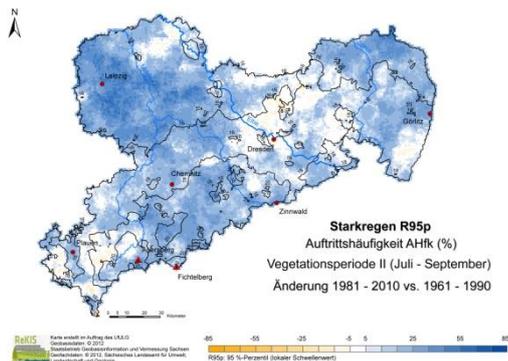
Sommer



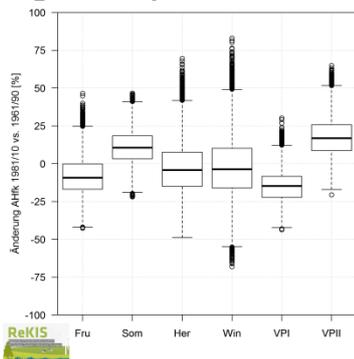
Herbst



Winter



Vegetationsperiode I



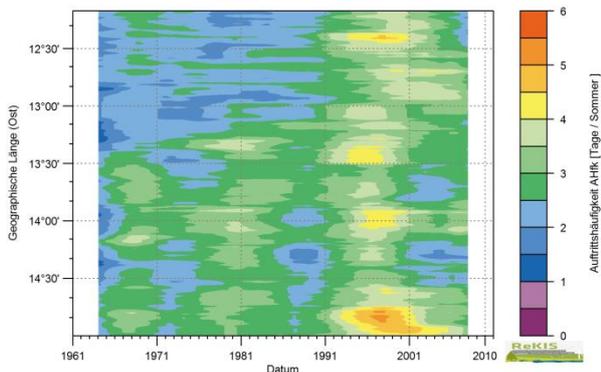
Vegetationsperiode II

Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

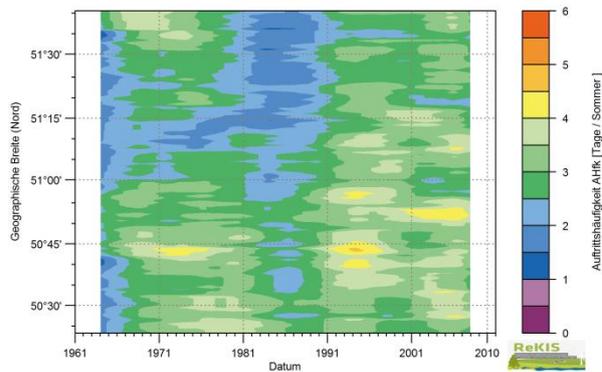
Box-Whisker-Plot

Abbildung 21: Flächenhafte Verteilung für die Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R95p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (Isolinien: Menge Starkregen R95p in mm); Box-Plot zu den flächenhaften Verteilungen

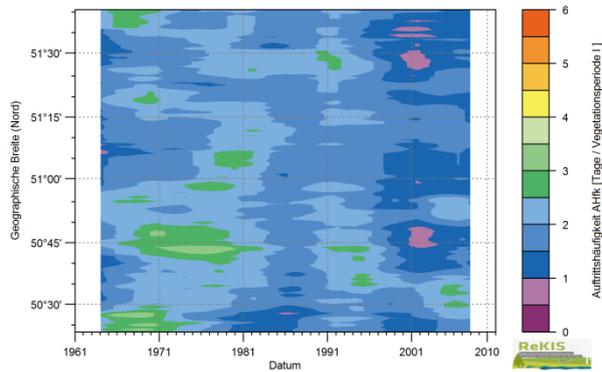
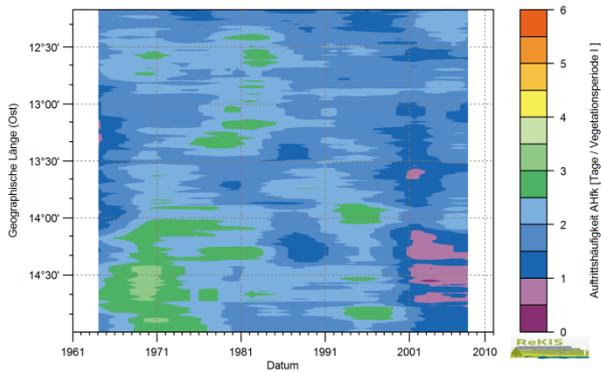
Transekt West-Ost



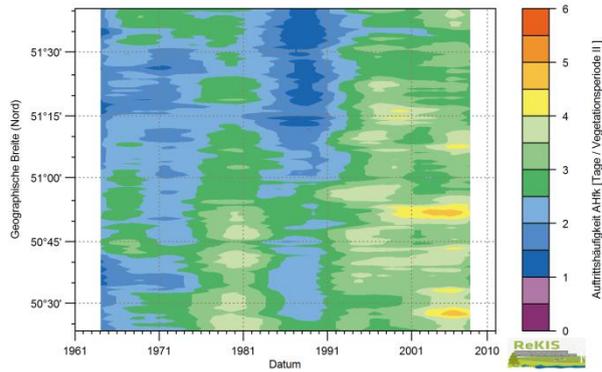
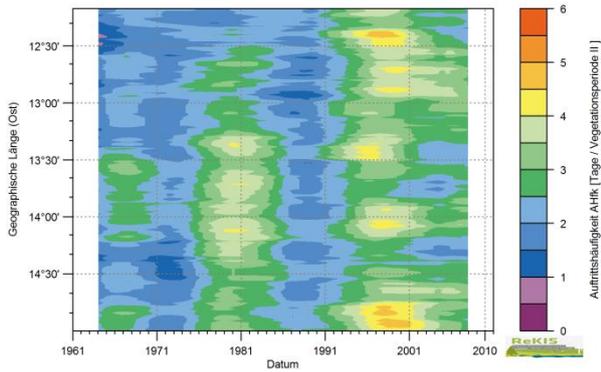
Transekt Nord-Süd



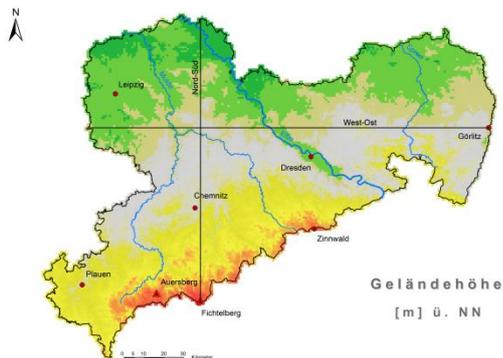
Sommer



Vegetationsperiode I (April-Juni)



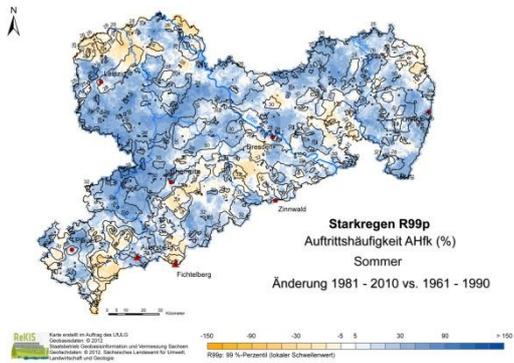
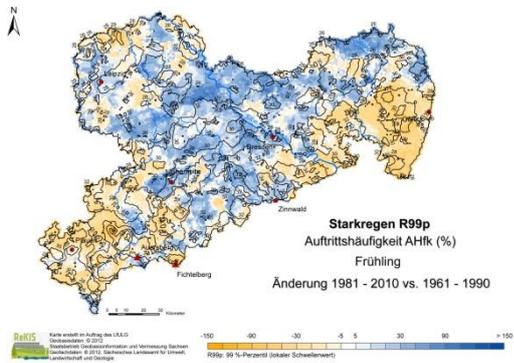
Vegetationsperiode II (Juli-September)



Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

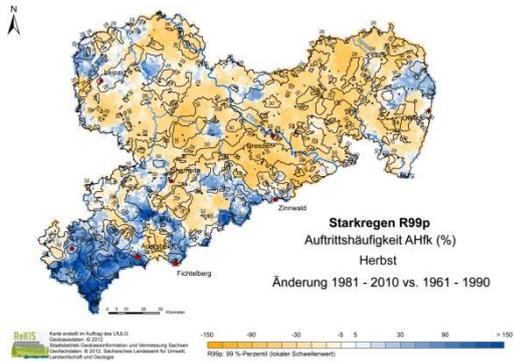
Lage der Transekte

Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R95p für die Transekte West-Ost und Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte



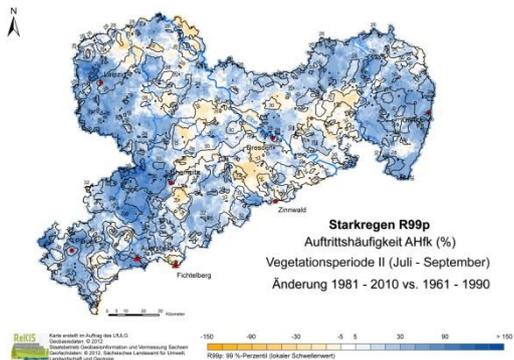
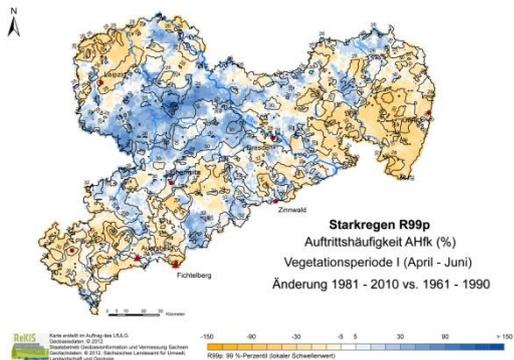
Frühling

Sommer



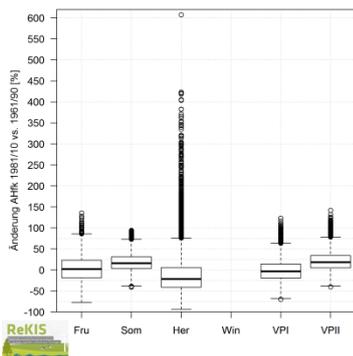
Herbst

Winter



Vegetationsperiode I

Vegetationsperiode II

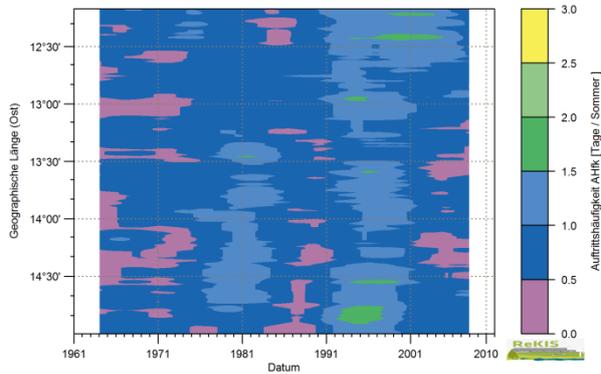


Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudo-stationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

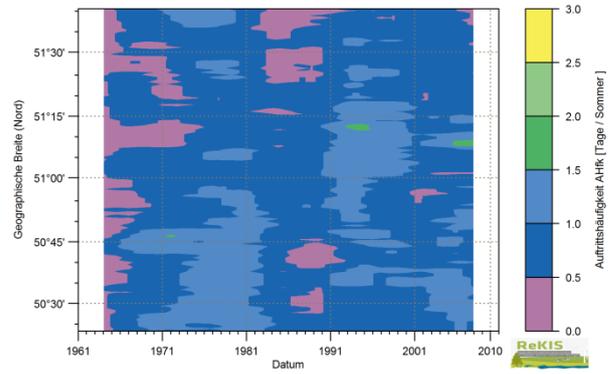
Box-Whisker-Plot

Abbildung 24: Flächenhafte Verteilung für die Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R99p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (Isolinien: Menge Starkregen R99p in mm); Box-Plot zu den flächenhaften Verteilungen

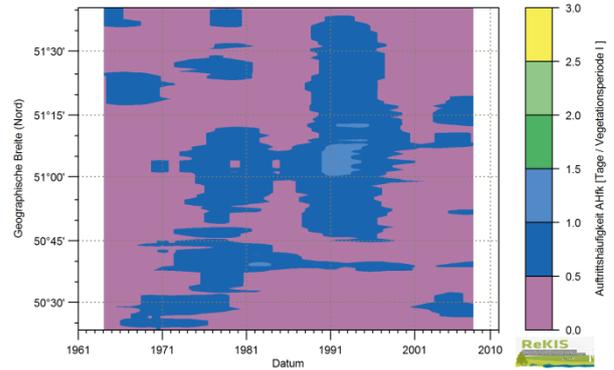
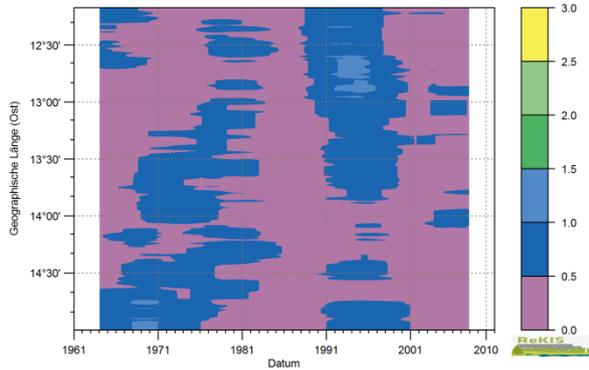
Transekt West-Ost



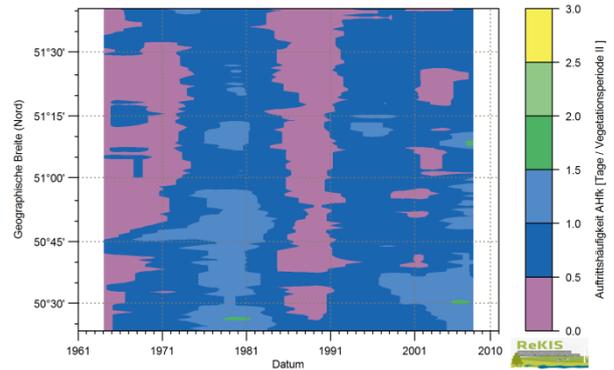
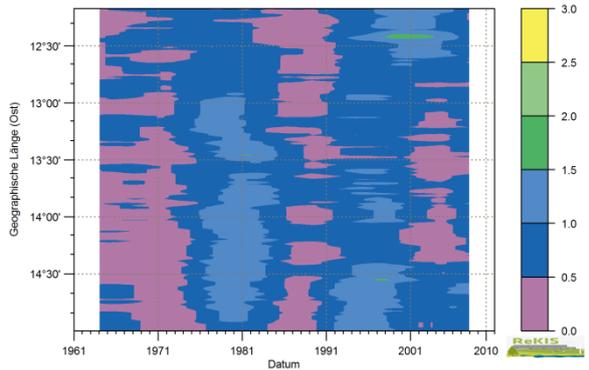
Transekt Nord-Süd



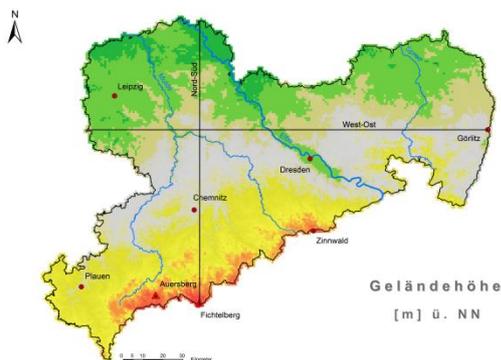
Sommer



Vegetationsperiode I (April-Juni)



Vegetationsperiode II (Juli-September)



Lage der Transekte

Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R99p für die Transekte West-Ost und Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte

Starkregen – Perzentilübergreifende Darstellung

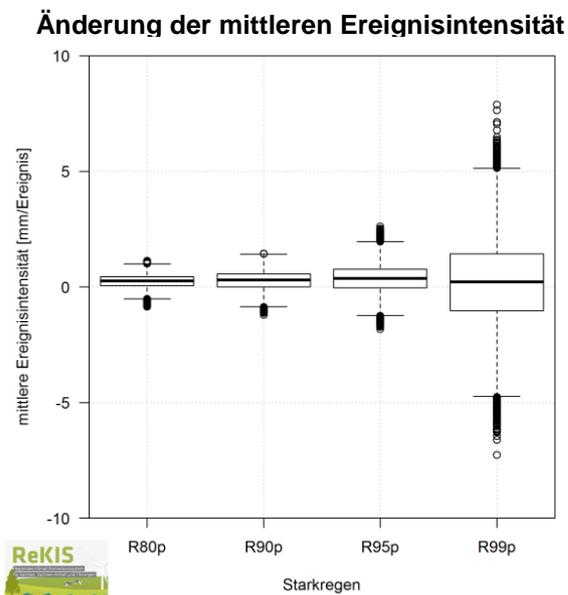
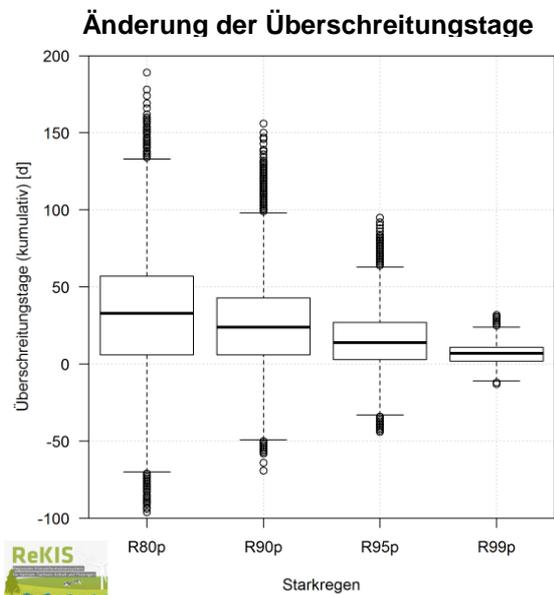
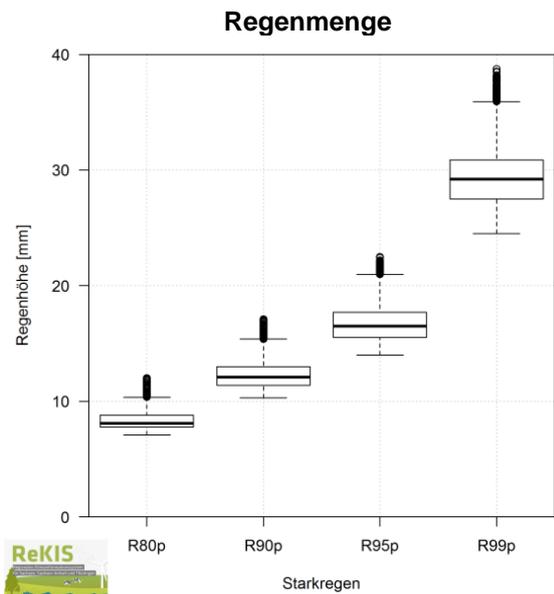


Abbildung 26: Box-Whisker-Plot zur flächenhaften Verteilung der Regenmenge (1961–1990), zur Änderung der Überschreitungstage (kumulativ) und zur Änderung der mittleren Ereignisintensität von Starkregeneignissen R80p, R90p, R95p und R99p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahr

Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

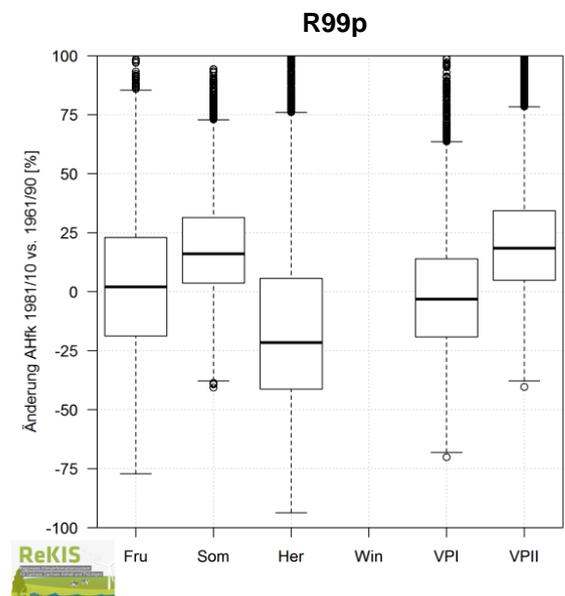
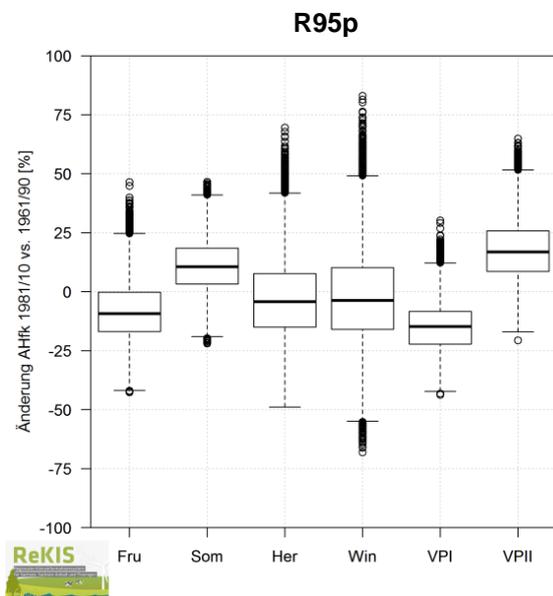
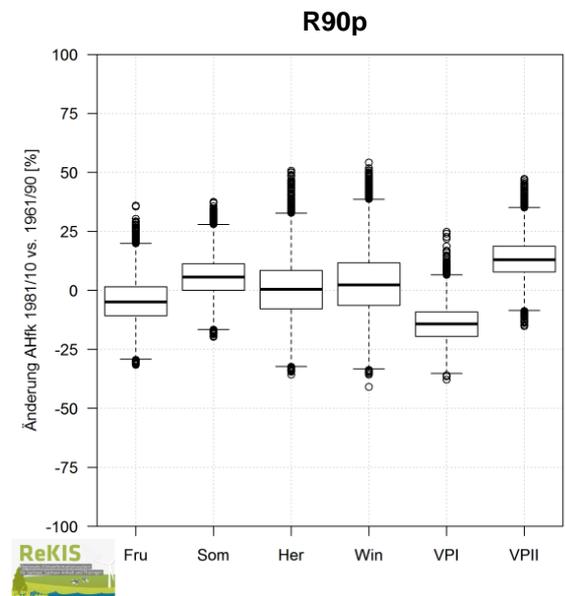
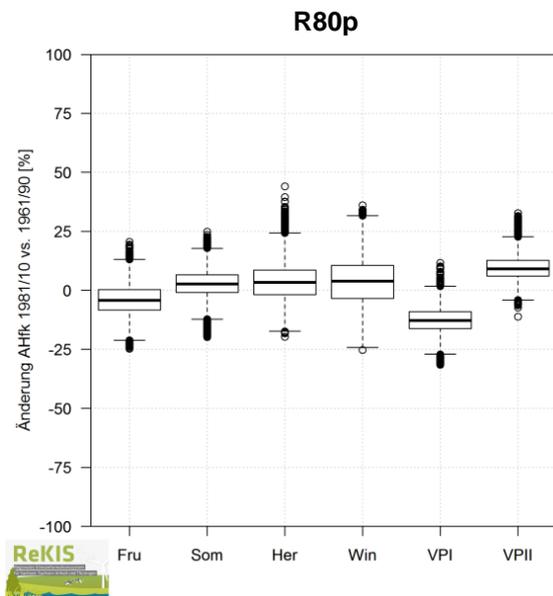


Abbildung 27: Box-Whisker-Plot zu den flächenhaften Verteilungen der Änderung (%) der Auftrittshäufigkeit AHfk von Starkregenereignissen R80p, R90p, R95p und R99p in Sachsen für 1981–2010 vs. 1961–1990, Jahreszeiten und Vegetationsperioden

Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000 Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

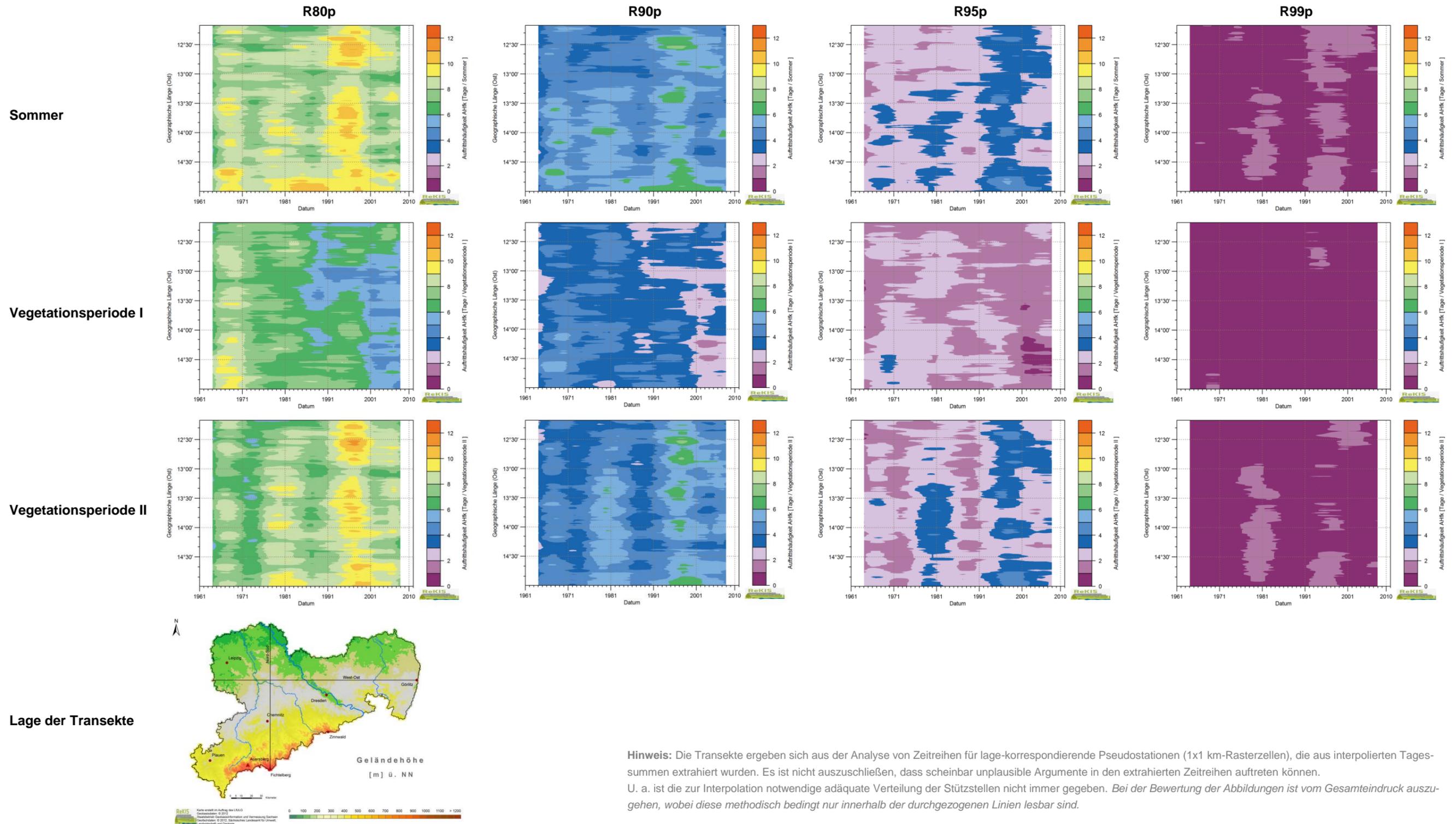


Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R80p, R90p, R95p, R99p für das Transekt West-Ost in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II; Lage der Transekte

Hinweis: Die Transekte ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für lage-korrespondierende Pseudostationen (1x1 km-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. U. a. ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen, wobei diese methodisch bedingt nur innerhalb der durchgezogenen Linien lesbar sind.

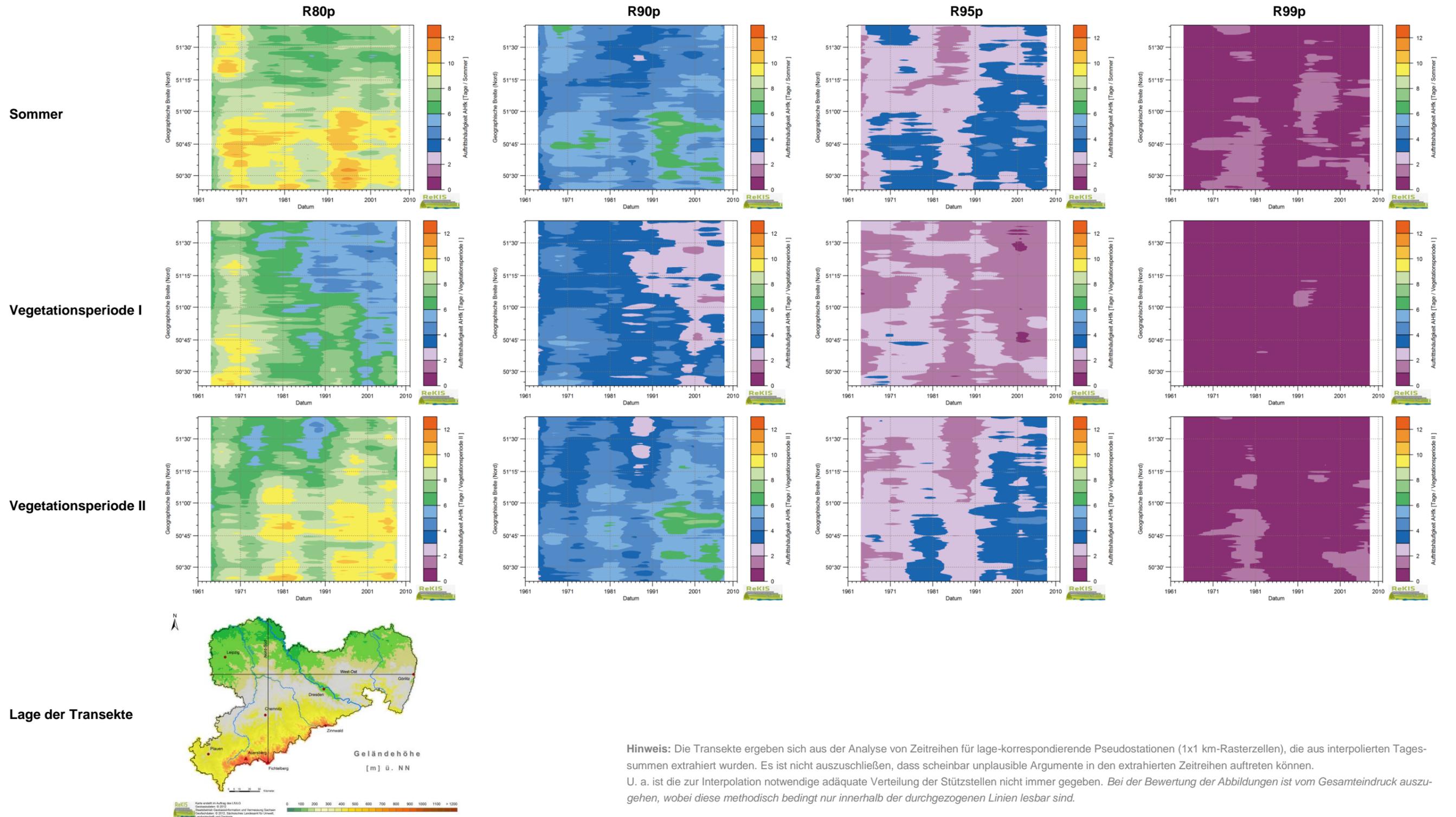


Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf (1961–2010) der Auftrittshäufigkeit AHfk (d^{-1}) von Starkregen R80p, R90p, R95p, R99p für das Transekt Nord-Süd in Sachsen, Sommer und Vegetationsperioden I und II; Lage der Transekte

7 Bewertung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der beste Dürreindex für das Aufdecken von Dürreauswirkungen vom jeweils analysierten System abhängig ist und die Leistungsfähigkeit der Indizes räumlich schwankt. Die Reaktion eines spezifischen Systems auf Trockenheit kann sehr komplex sein und entsprechend des analysierten Systems und seiner räumlichen Lage kann es große Unterschiede hinsichtlich der kumulativen Periode des Wasserdefizites geben, welche notwendig ist, um negative Auswirkungen auf das betrachtete System zu haben (VICENTE-SERRANO et al. 2011). Daher sind für die Ausarbeitung von Empfehlungen für eine konkrete Region detaillierte Analysen von Dürreindizes in dieser Region notwendig. Zudem empfiehlt es sich, die Leistungsfähigkeit der Indizes für verschiedene Impactkategorien über Korrelationsanalysen auszutesten. Diese Analysen sind vor allem auch für die Identifikation der regional passenden Schwellenwerte der Indizes für die verschiedenen Dürrekategorien notwendig. Nicht immer sind die allgemein zu den Indizes angegebenen Schwellenwerte und Kategorien in der jeweiligen Region sinnvoll anwendbar.

Die Mehrzahl der Dürreindizes verwendet die allgemeine Dürredefinition „Dürre = Abweichung von einem mittleren Langzeitzustand“ für die Erstellung des Index und vergleicht die aktuellen Feuchtebedingungen mit dem jeweiligen (saisonalen) Normalwert. Häufig werden die Daten normalisiert und standardisiert und es wird die so genannte z-Transformation vorgenommen. Das heißt, es wird die Differenz zwischen dem jeweils aktuellen Indikator für den Feuchtigkeitszustand (z. B. Niederschlag, klimatische Wasserbilanz, Bodenfeuchte, Abfluss) und dem klimatologischen Mittelwert (meist für 30 bis 50 Jahre) gebildet und durch die Standardabweichung (für den gleichen Zeitraum wie der klimatologische Mittelwert) geteilt. Diese Vorgehensweise liefert also eine relative Bewertung von Trockenheit und grenzt sich dadurch deutlich von der Aridität als permanente Trockenheit ab. Für einige Anwendungen ist jedoch auch das absolute Feuchtedefizit von Bedeutung. Auch für dessen Beschreibung existieren Indizes, allerdings sind diese Indexwerte dann schlecht über Zeit und Raum miteinander vergleichbar.

Wenn man nur wenige Daten vorliegen hat und eine erste schnelle Bewertung von Trockenheit vornehmen möchte, dann empfehlen sich niederschlagsbasierte Indizes wie der SPI, die je nach Anwendungszweck auf verschiedenen Zeitskalen (ab Monatsdaten) berechnet werden können. Durch diese Möglichkeit seiner Berechnung auf multiplen Zeitskalen kann der SPI potenziell für viele verschiedene Anwendungen genutzt werden. Eine Reihe von Studien hat gezeigt, dass der SPI gute Korrelationen mit einer Vielzahl von Umwelt- und Impactvariablen zeigt. Sinnvoll ist hier die Analyse, auf welcher Zeitskala der SPI die besten Korrelationen mit der interessierenden Variable zeigt, wobei durchaus auch andere Zeitskalen als die üblichen 1, 3, 6, 9, 12 und 24 Monate verwendet werden können.

Neben diesen Niederschlagsanomalien (auf Monatsbasis) beschreibenden Indizes ist die Anwendung von auf Tagesniederschlagsdaten beruhenden Ansätzen sinnvoll, welche sich ankündigende Dürren schon frühzeitig erkennen können bzw. besonders trockene Zeitabschnitte innerhalb länger andauernder Perioden mit Niederschlagsdefiziten anzeigen. Die Analyse solcher auf Tagesdaten basierenden Trockenperioden kann im Rahmen der beobachteten und projizierten Klimaänderungen weiter an Bedeutung gewinnen. Wenn die Häufigkeit von Trockenphasen gleichzeitig mit der von Starkniederschlagsereignissen steigt, dann können auf Monatsbasis aggregierte Indizes landwirtschaftlich relevante Trockenheiten immer schlechter abbilden.

Der von der WMO als universaler Dürreindex vorgeschlagene SPI zeigt im Mittel eine sehr gute Übereinstimmung mit komplexeren meteorologischen Indizes, welche auch Temperatur- bzw. Evaporationsdaten betrachten und somit neben der Dargebotsseite an Feuchtigkeit auch den Verbrauch in die Bewertung von Dürre

einbeziehen. So haben vielfältige Untersuchungen gezeigt, dass der SPI dem komplexeren PDSI in vielen Fällen überlegen ist. Grundsätzlich ist also die zeitliche Variabilität des Niederschlags die entscheidende Größe für das Auftreten und die Intensität von Dürren, jedoch können auch andere Klimafaktoren die jeweilige Schwere der Dürre abschwächen oder intensivieren. Falls ausreichende Klimadaten vorliegen, ist die Verwendung des SPEI dem SPI vorzuziehen, weil er eine realistischere Einschätzung der Dürregefährdung liefert. Wichtig ist dabei der verwendete Ansatz zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration. Mit rein temperaturbasierten Ansätzen vernachlässigt man den Einfluss von beispielsweise der Globalstrahlung, welche die Verdunstungsraten stark beeinflussen kann. Sollen Trenduntersuchungen hinsichtlich der beobachteten und v. a. der zukünftig projizierten Dürreverhältnisse vorgenommen werden, so empfiehlt sich die Betrachtung von Temperatur- und Strahlungsdaten einbeziehenden Indizes, weil es sonst leicht zu einer Unterschätzung der zukünftigen Dürregefährdung kommen kann. Studien haben gezeigt, dass Dürren am Ende des 21. Jahrhunderts als deutlich schwerwiegender eingestuft werden, wenn der PDSI oder SPEI zugrundegelegt werden und nicht der SPI. Die Dürretrends sind dementsprechend für SPEI und PDSI häufig größer als die des SPI und selbst in Gebieten mit nahezu gleichbleibenden Niederschlagssummen kann sich die Dürregefährdung aufgrund der mit den steigenden Temperaturen ebenfalls ansteigenden Evapotranspiration erhöhen.

Zur genauen Bewertung von Dürren in der Landwirtschaft sind die meteorologischen Dürreindizes meist unzureichend, weil sie die verschiedenen Entwicklungsstadien der Pflanzen – in denen sie beispielsweise besonders sensitiv gegenüber Trockenheit oder Hitze sind – nicht mit in die Bewertung einbeziehen. So kann ein auf der Basis der Bewertung von Monatsanomalien normaler oder gar feuchter Monat landwirtschaftlich relevante Trockenphasen beinhalten, wenn diese in ein sensibles Entwicklungsstadium der Pflanzen fallen und die entsprechenden Niederschlagssummen erst am Ende des Monats – z. B. im Rahmen von Starkniederschlagsereignissen – fallen. Für die Bewertung landwirtschaftlicher Dürren bietet sich die Verwendung von Bodenwasserhaushaltsmodellen an, welche die aktuelle Evapotranspiration der jeweiligen Nutzpflanzen dem verfügbaren Feuchtigkeitsdargebot gegenüberstellen und die Bodenfeuchte berechnen. Anhand solcher Modellierungen können auch evtl. benötigte Zusatzbewässerungen geplant werden.

Die Bewertung hydrologischer Dürren erfolgt zumeist basierend auf Abflussdaten oder Wasserhaushaltsmodellierungen. Zum Teil werden auch meteorologische Indizes auf langen Zeitskalen erfolgreich für die Beschreibung hydrologischer Dürrezustände verwendet. Hydrologische Dürren treten oft zeitlich entkoppelt von den meteorologischen und landwirtschaftlichen Dürren auf und sollten daher auch getrennt analysiert werden.

Für die Etablierung eines regionalen Dürremonitorings sollten verschiedene Indizes miteinander kombiniert werden. Dabei kann auf von verschiedenen Stellen (z. B. DWD-GPCC, DWD-Agrarmeteorologie, EDO) bereitgestellte Informationen zurückgegriffen werden. Bei der Auswahl der Dürreindizes sollte der jeweilige Anwendungszweck immer im Auge behalten werden, weil es kaum möglich ist, mit einem Index – auch nicht mit einem kombinierten Index – Dürreauswirkungen auf verschiedenen Zeitskalen gleichzeitig zu erfassen und abzubilden. Der US-Dürremonitor versucht eine solche kombinierte Darstellung und ist damit auch recht erfolgreich – dennoch beinhaltet er eine subjektive Komponente der Expertenbewertung und bietet nur ein recht vereinfachtes und räumlich grob aufgelöstes Schema der Dürreklassifizierung. Die Dürrebewertung sollte also immer sektor- bzw. anwendungsspezifisch erfolgen. Ein für die Landwirtschaft relevantes Dürreereignis muss beispielsweise noch lange keine Auswirkungen auf die (Trink-)Wasserversorgung haben und während einer hydrologischen Dürre können die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen gut mit Wasser versorgt sein.

Als weitere Schritte in der Charakterisierung von Trockenheit in Sachsen ist zunächst eine Ausweitung der Analysen auf weitere Stationen oder Rasterdaten angeraten. Zudem sollten weitere Dürreindizes in die Untersuchung einbezogen und miteinander verglichen werden. Wichtig ist dabei die Einbeziehung von relevanten

Impactgrößen, an denen die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Indizes gemessen werden kann. Im Hinblick auf landwirtschaftliche, hydrologische und Grundwasserdürren liefert dieser Bericht nur sehr eingeschränkte Aussagen. In Zukunft sollten verstärkt die Bodenfeuchtemodellierungen des DWD-Agrarmeteorologie und Abflussdaten verschiedener Einzugsgebiete mit in die Dürrebewertung einbezogen werden. Auch das Potenzial von Fernerkundungsdaten für das Dürremonitoring sollte weiter untersucht werden. Es gibt eine Vielzahl von Produkten, die zum Teil frei verfügbar sind und durchaus für ein regionales Dürremonitoring genutzt werden können.

Die flächenhafte Analyse des Starkniederschlagsverhaltens anhand von vier Perzentilen (R80p, R90p, R95p, R99p) belegt die räumlichen und zeitlichen Veränderungen des Starkniederschlags. Prinzipiell ist das Verhalten der unterschiedlich starken Regenereignisse hinsichtlich Menge, Intensität und Auftrittshäufigkeit recht ähnlich. Lediglich die stärksten Regenereignisse weisen zum Teil ein abweichendes Verhalten auf. Die zunehmende Hitzebelastung im Sommerhalbjahr, insbesondere in den tieferen Lagen, schafft Bedingungen für eine vermehrte Entstehung von Hitzegewittern. Erhöhte Starkregenmengen und -häufigkeiten in den bergigen Regionen sind begründet mit der Verdriftung und dem orografisch erzwungenen Aufstieg dieser feuchten Luftmassen. Die unter der Hitze entstandenen Luftmassen gelangen oft nicht mehr bis ins Gebirge, sondern regnen vorher ab. Dadurch nimmt die Abhängigkeit von Starkregenereignissen von der Höhe zunehmend ab. Auffällig ist die Häufung von Starkniederschlägen in ehemaligen bzw. noch aktiven Braunkohleregionen wie dem Mitteldeutschen und Lausitzer Braunkohlerevier. Es wird vermutet, dass die Hitzebelastung auf den oft nur spärlich besiedelten Flächen besonders hoch ist. Gepaart mit rekultivierten Seenflächen birgt das ein großes Potenzial für die Entstehung von konvektiven Starkniederschlägen. Um diesbezüglich zu belastbaren Aussagen zu gelangen, wären tiefgreifendere Analysen nötig. Extremste Starkniederschlagsereignisse wurden häufig durch Vb-Wetterlagen verursacht. Um den Ursachen (Wetterlagen, verstärkte Konvektion durch erhöhte Temperaturen etc.) für Veränderungen in der Starkniederschlagscharakteristik auf den Grund zu gehen, sind gezielte Untersuchungen zu starkregenrelevanten Wetterlagen durchzuführen.

8 Zusammenfassung

- Zahlreiche Studien belegen die Veränderungen des Klimas in den letzten Jahrzehnten und die damit verbundenen Auswirkungen in Sachsen. Von besonderer Bedeutung für die Region sind Veränderungen im Niederschlags- und Temperaturverhalten. Insbesondere die extremen Ausprägungen Hitze, Starkregen und Trockenperioden sind von größtem Interesse für zahlreiche sozio-ökonomische Bereiche. Ziel dieser Studie ist es, einen Überblick über den aktuellen Wissensstand zu Dürreindizes und -monitoring zu geben sowie die Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Trockenperioden und Starkniederschlägen in Sachsen zu analysieren.
- Es erfolgte eine Recherche auf regionaler und internationaler Ebene zu Möglichkeiten der Charakterisierung und Quantifizierung von Dürreepisoden mit spezifischem Fokus auf die Impactrelevanz, also die direkte Verwendbarkeit für Forst-, Wasser- und Landwirtschaft. Wichtig ist das Verständnis des Zeitskalen übergreifenden Charakters von Dürren. Abweichungen des Niederschlags (bzw. der klimatischen Wasserbilanz) vom Normalzustand werden als meteorologische Trockenheit bezeichnet. Bei fortschreitender Andauer des Defizits werden immer tieferliegende Bodenwasserspeicher entleert und es entwickeln sich landwirtschaftliche (wenige Monate) und hydrologische (zumeist > 6 Monate) Dürren. Kurze Aufwechungsphasen, die aus meteorologischer Sicht wieder zu Normalbedingungen führen, heben nicht zwangsläufig die Dürrebedingungen in tieferen Wasserspeichern auf. Zur Beschreibung von Trockenheit wurden mehr als 100 Indizes in den Kategorien meteorologische, hydrologische und landwirtschaftliche Dürreindizes sowie auf Fernerkundungs-

daten basierende und kombinierte Indizes übersichtlich tabelliert. Eine Kurzbeschreibung, Referenzen, die Auflistung der Eingangsdaten (inkl. der zeitlichen Auflösung), der Einsatzzweck und weiterführende Informationen ermöglichen einen schnellen Überblick über die Indizes.

- Exemplarisch wurden für fünf Stationen im Zeitraum 1961–2013 ausgewählte meteorologische Dürreindizes mit unterschiedlichen Datenanforderungen berechnet und mit Modellierungen der Bodenfeuchte verglichen. Weil Dürreperioden in dieser Region zum überwiegenden Teil auf Niederschlagsdefiziten beruhen, sind niederschlagsbasierte Indizes deutlich aussagekräftiger als rein temperaturbasierte Indizes. Vor allem im Sommerhalbjahr werden Dürren durch eine erhöhte Verdunstung verschärft, weshalb Indizes, die diesen Verlust berücksichtigen, Trockenperioden noch umfassender charakterisieren. Allerdings sind die Datenanforderungen hierfür recht hoch. Vergleiche zur simulierten Bodenfeuchte belegen die Eignung der gewählten meteorologischen Trockenindizes SPI und SPEI zur Charakterisierung kurzfristiger Dürren mit Relevanz für die Landwirtschaft.
- Für ein 1 x 1 km-Gitter in Sachsen (19.572 Punkte) wurden mittels des 80., 90., 95. und 99. Perzentils des Niederschlags die Veränderungen im Starkregenverhalten analysiert. Die hinter jedem Perzentil stehende Niederschlagsmenge weist einen ausgeprägten Höhengradienten auf, wobei in den höheren Lagen jeweils größere Regenmengen anfallen. Analysiert wurde die Häufigkeit des Überschreitens dieser vier Schwellwerte, welche sich von der Klimanormalperiode 1961–1990 zur aktuellen Periode 1981–2010 markant verändert hat. Besonders auffällig sind die Verminderung der Aufttrittshäufigkeit in der Vegetationsperiode I (VPI, April bis Juni) sowie die Erhöhung in der Vegetationsperiode II (VP II, Juli bis September). Während in der VPI abnehmende Niederschläge zu vermehrten Trockenperioden führten, traten auch in VP II – trotz erhöhter Niederschlagsmengen – zunehmend trockene Perioden auf (Grund: Intensivierung des Niederschlags). Entlang von zwei durch Sachsen gelegten Transekten wird die räumliche Verteilung der Aufttrittshäufigkeiten (hohe Häufigkeit in den Bergen, wechselnde breitengradparallele Gradienten) und die zeitliche Variabilität der Aufttrittshäufigkeiten von Starkniederschlägen aufgezeigt.
- Die Wechselwirkungen zwischen Trockenperioden und Starkniederschlägen wurden durch den Vergleich von simulierten Bodenfeuchten, meteorologischen Trockenperioden (metTP) und Starkniederschlägen aufgezeigt. Ob Bodenwasserdefizite signifikant vermindert werden und inwieweit die Pflanzen ausreichend versorgt werden können, hängt von der Höhe der Niederschläge, der Jahreszeit, den Vorfeuchtebedingungen und den Bodenbedingungen ab.
- Um in Zukunft ein Dürremonitoring für Sachsen aufzubauen, müssen regionsspezifische Analysen erfolgen. Die Leistungsfähigkeit von Dürreindizes ist durch Korrelationsanalysen mit Impactkategorien zu testen (z. B. Ernteerträge, Grundwasserstände). Der Auswirkungen des Klimawandels sollten bei Wahl der Indizes berücksichtigt werden.

9 Literaturverzeichnis

- ACHUTUNI VR, STEYAERT LT, SAKAMOTO CM (1982) An Early Warning Assessment Program for Drought/Food Shortages in South and Southeast Asia: Final Report on Test and Evaluation. Final Report to USAID/OFDA. AISC Models Branch, 157 S (zitiert in SAKAMOTO et al. 1984)
- AGNEW CT (2000) Using the SPI to identify drought. *Drought Network News* 12: 6-12
- AKINREMI OO, MCGINN SM, BARR AG (1996) Evaluation of the Palmer drought index on the Canadian prairies. *J. Climate*, 9, 897–905.
- ALEXANDER LV, ZHANG X, PETERSON TC, CAESAR J, GLEASON B, KLEIN TANK AMG, HAYLOCK M, COLLINS D, TREWIN B, RAHIMZADEH F, TAGIPOUR A, KUMAR KR, REVADEKAR J, GRIFFITHS G, VINCENT L, STEPHENSON DB, BURN J, AGUILAR E, BRUNET M, TAYLOR M, NEW M, ZHAI P, RUSTICUCCI M, VAZQUEZ-AGUIRRE JL (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. - *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 111, D05109.
- ALLEN RG (1986) A Penman for all Seasons. – *Journal Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 112,348-369
- ALLEN RG, SMITH M, PERRIER A & PEREIRA LS (1994) An Update for Definition of Reference Evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43, 2, 1-34.
- ALLEN RG, PEREIRA LS, RAES D, SMITH M (1998) Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56. FAO, Rome, Italy. (<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>; abgerufen am 13.10.2014)
- ALLEN CD, MACALADYB AK, CHENCHOUNIC H, BACHELETD D, MCDOWELLE N, VENNETIERF M, KITZBERGERG T, RIGLINGH A, BRESHEARS DD, HOGGJ EHT, GONZALEZK P, FENSHAML R, ZHANGM Z, CASTRON J, DEMIDOVAN N, LIMP J-H, ALLARDQ G, RUNNINGR SW, SEMERCIS A, COBBT N (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.*, 259, 660–684.
- ALLEY WM (1984) The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:1100-1109
- ALLEY WM (1985) Palmer drought severity index as a measure of hydrologica drought. *Water Resour. Bull.*, 21, 105–114.
- AMOR LG, CARRASCO A, IBÁÑEZ JC (2009) Using and Testing Drought Indicators. In: *Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems*, 257-272
- ANDERSON MC, NORMAN JM, DIAK GR, KUSTAS WP, MECIKALSKI JR 1997: A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 60, 195–216.
- ANDERSON MC, NORMAN JM, MECIKALSKI JR, OTKIN JP, KUSTAS WP (2007a) A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental U.S. based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. *J. Geophys. Res.*, 112, D10117, doi:10.1029/2006JD007506.
- ANDERSON MC, NORMAN JM, MECIKALSKI JR, OTKIN JP, KUSTAS WP (2007b) A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental U.S. based on thermal remote sensing: 2. Surface moisture climatology. *J. Geophys. Res.*, 112, D11112, doi:10.1029/2006JD007507.
- ANDERSON MC, HAIN C, WARDLOW B, PIMSTEIN A, MECIKALSKI JR, KUSTAS WP (2011) Evaluation of Drought Indices Based on Thermal Remote Sensing of Evapotranspiration over the Continental United States. *J. Climate*, 24, 2025–2044. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3812.1>
- ARENA C, CANNAROZZO M, MAZZOLA MR (2006) Multi-year drought frequency analysis at multiple sites by operational hydrology – A comparison of methods. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(18): 1146-1163.
- ARNOLD JG, SRINIVASAN R, MUTTIAH RS, WILLIAMS JR (1998) Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1. Model development. *J. Am. Soc. Water Res. Assoc.* 34 (1), 73–89.
- BAIER W (1967) Recent ad-

- vances in the use of standard climatic data for estimating soil moisture. *Annals of Arid Zone Research* 6(1).
- BAIER W, ROBERTSON GW (1966). Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian Journal of Plant Science* 45:276-284.
- BALINT Z, MUTUA FM, MUCHIRI P (2011): Drought Monitoring with the Combined Drought Index, FAO-SWALIM Nairobi, Kenya.
- BANERJI S, CHABRA BM (1964) Drought Characteristics and Estimating Probabilities of Their Occurrences, in Surface Waters Symposium, WMO/IASH, Belgium, Publication No. 63, 189-192 (<http://ks360352.kimsufi.com/redbooks/a063/063019.pdf>; abgerufen am 13.10.2014)
- BARBER VA, GP JUDAY GP, FINNEY BP (2000) Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 405, 668–673.
- BARGER GL, THOM HCS (1949) A method for characterizing drought intensity in Iowa. *Agronomy Journal* 41:13-19.
- BARUA S, NG AWM, PERERA BJC (2011) Comparative evaluation of drought indexes: Case study on the Yarra River catchment in Australia. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 137, 215–226.
- BASTIAANSEN WGM, BRITO RAL, BOS MG, SOUZA MG, CAVALCANTI EB, BAKKER MM (2001) Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. *Irrigation and Drainage Systems* 15: 53-79.
- BATES CG (1935) Climatic Characteristics of the Plains Region. In M SILCOX et al. (Hrsg.), Possibilities of Shelterbelt Planting in the Plains Region, Washington D.C., zitiert von WMO (1974)
- BAYARJARGAL Y, KARNIELI A, BAYASGALAN M, KHUDULMUR S, GANUSH C, TUCKER CJ (2006) A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sens. Environ.*, 105: 9-22.
- BECK CH, GRIESER J, TRÖMEL S (2004) Die Trockenperiode des Jahres 2003 in Deutschland im Kontext langzeitlicher Niederschlagsvariabilität. In: Klimastatusbericht 2003, S. 142-151. (http://www.nid.bayern.de/ereignisse/doc/DWD_Trockenperiode_2003.pdf; abgerufen am 01.10.2014)
- BECKER, T. & SCHRÖTER H. (2001): Die Ausbreitung des Borkenkäferbefalls im Bereich von Sturmwurf Sukzessionsflächen. Eine Untersuchung in Sturmwurfbanwäldern Baden-Württembergs. – Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 26, 10 S.
- BEN-ZVI A (1987) Indices of hydrological drought in Israel. *Journal of Hydrology* 92: 179–191.
- BENDER S, SCHALLER M (2014) Vergleichendes Lexikon. - Wichtige Definitionen, Schwellenwerte und Indices aus den Bereichen Klima, Klimafolgenforschung und Naturgefahren. Climate Service Center, 126 S.
- BERAN MA, RODIER JA (1985) Hydrological aspects of drought. UNESCO-WMO Studies and Reports in Hydrology 39: 149. (http://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SR_039_E_1985.pdf; abgerufen am 01.10.2014)
- BERGMAN KH, SABOL P, MISKUS D (1988) Experimental indices for monitoring global drought conditions. Proc. 13th Annual Climate Diagnostics Workshop, Cambridge, MA, U.S. Dept. of Commerce, 190–197. (<https://archive.org/stream/proceedingsof00clim#page/n205/mode/2up>; zugegriffen am 17.10.2014)
- BERNHOFER C, GOLDBERG V, FRANKE J (2005) REKLI II – Optimierung der Klimadatenbank REKLI für Auswertungen im Bereich der Wasserwirtschaft. Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben des Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt und der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (VertragNr.: 54/20202), 22 S.
- BERNHOFER C, GOLDBERG V, FRANKE J, HÄNTZSCHEL J, HARMANSA S, PLUNTKE T, GEIDEL K, SURKE M, PRASSE H, FREYDANK E, HÄNSEL S, MELLENTIN U, KÜCHLER W (2008) Sachsen im Klimawandel – Eine Analyse. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.) SMUL, Dresden.
- BERNHOFER C, FRANKE J, KURBUHN C, HUPE F (2009) Ableitung von Rasterdaten aus gemessenen und projizierten Klimazeitreihen für den Freistaat Sachsen. Abschlußbericht zum Forschungs- und Entwicklungs-

- vorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (AZ: 24-8802.26/22/1).
- BERNHOFER C, FRANKE J, DONIX T, KÖRNER P, FISCHER S, SCHALLER A, KIRSTEN L, PRASSE H, KOSTROWSKI D (2015) Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des LfULG, Schriftenreihe des LfULG, Heft 3/2015.
- BHALME HN, MOOLEY DA (1980) Large scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108, 8, 1197-1211.
- BLUMENSTOCK G JR. (1942) Drought in the United States analyzed by means of the theory of probability. *USDA Tech. Bull.* 819, 63 pp. (digitalisierte Version unter <http://quod.lib.umich.edu/g/genpub/17038117.0819.001/52?page=root;rgn=full+text;size=100;view=image>; zugegriffen am 17.10.2014)
- BÖTTCHER F, MÜLLER J, SCHMIDT M (2010) Das agrarmeteorologische Bodenwasserhaushaltsmodell MET-VER. - Arb.papier d. Dt. Wetterdienstes.
- BÖTTCHER F (2014a) Freundliche mündliche Mitteilung; 17.11.2014.
- BÖTTCHER F (2014b) Ergebnisse der Simulation mittels des Modells METVER für die fünf Standorte Dresden-Klotzsche, Görlitz, Wittenberg, Chemnitz und Fichtelberg für den Zeitraum 1961–2013 (unveröffentlicht); 18.11.2014.
- BONACCI O (1993) Hydrological Identification of Drought, *Hydrological Processes* 7: 249-262.
- BOS MG, BURTON MA, MOLDEN DJ (2005) *Irrigation and Drainage Performance Assessment; Practical Guidelines*, CABI Publishing, Wallingford, UK, 156 pp.
- BRITISH RAINFALL ORGANIZATION (1936) *British Rainfall*, Air Ministry, Meteorological Office, London, (zitiert in WMO 1975)
- BROWN JF, WARDLOW BD, TADESSE T, HAYES MJ, REED BC (2008) The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): An integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. *GIScience and Remote Sensing* 45(1):16-46.
- BRUSCHEK GJ (1994): Waldgebiete und Waldbrandgeschehen in Brandenburg im Trockensommer 1992. *PIK-Report 2*: 245-264.
- BRUWER JJ (1990) Drought Policy in the Republic of South Africa, in *Proceedings of the SARCCUS Workshop on Drought*, June 1989, ISBN 0 949986 24 0
- BRYANT EA (1991) *Natural Hazards*. Cambridge University Press, Cambridge.
- BRYANT SJ, ARNELL NW, LAW FM (1992) The longterm context for the current hydrological drought. In *Proc. IWEM Conf. on the Management of Scarce Water Resources*. (zitiert in PHILLIPS & MCGREGOR 1998)
- BUCHNER W, MÜLLER J, SOURELL H (2006): Grundlagen und Anwendung der Agrarmeteorologie im Pflanzenbau. In: LÜTKE ENTRUP N, OEHMICHEN J (Hrsg.) *Lehrbuch des Pflanzenbaues*, Band 1: Grundlagen. Agro-Concept, Bonn: 621 – 711.
- BURKE EJ, BROWN SJ, CHRISTIDIS N (2006): Modelling the recent evolution of global drought and projections for the 21st century with the Hadley Centre climate model. - *Journal of Hydrometeorology*, 7, 1113-1125.
- BURKE EJ, BROWN SJ (2008) Evaluating uncertainties in the projection of future drought. *Journal of Hydrometeorology*, 9(2), 292-299.
- BYUN HR, KIM DW (2010) Comparing the Effective Drought Index and the Standardized Precipitation Index. In: López-Francos A (Hrsg.). *Economics of drought and drought preparedness in a climate change context*. Zaragoza : CIHEAM / FAO / ICARD A / GD AR / CEIGRAM / MARM. p. 85-89 (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 95) (<http://om.ciheam.org/om/pdf/a95/00801330.pdf>; abgerufen am 08.10.2014).
- BYUN HR, WILHITE DA (1999) Objective quantification of drought severity and duration. *J. Climate* 12: 2747–2756.
- CAI W, COWAN T (2008) Evidence of impacts from rising temperature on inflows to the Murray-Darling Basin. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07701, doi:10.1029/2008GL033390.

- CAMARERO JJ, BIGLER C, LINARES JC, GIL-PELEGRÍN E (2011) Synergistic effects of past historical logging and drought on the decline of Pyrenean silver fir forests. *For. Ecol. Manage.*, 262, 759–769.
- CANCELLIERE A, SALAS JD (2004), Drought length properties for periodic-stochastic hydrologic data, *Water Resour. Res.*, 40, W02503, doi:10.1029/2002WR001750.
- CANCELLIERE A, BONACCORSO B, CAVALLARO L, ROSSI G (2005) Regional Drought Identification Module REDIM. Extended Version 2005.1. Reference Guide. University of Catania, October 2005.
- CARNICER J, COLL M, NINYEROLA M, PONS X, SÁNCHEZ G, PEÑUELAS J (2011) Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 1474–1478.
- CEAS (1979) A Study of the Caribbean Basin Drought/Food Production Problem. Final Report to USAID/OFDA (zitiert in SAKAMOTO et al. 1984 als STEYAERT L et al. 1979)
- CHAVES MM, MAROCO JP, PEREIRA JS (2003) Understanding plant responses to drought—From genes to the whole plant. *Funct. Plant Biol.*, 30, 239–264.
- CHOW VT (HRSG.) (1964) Handbook of Applied Hydrology, Mc-Graw-Hill, New York, Chap. 18. (zitiert in WILHITE & GLANTZ 1985)
- CHUNG C, SALAS JD (2000) Drought occurrence probability and risks of dependent hydrologic processes, *J. Hydrol. Eng.*, 5(3), 259–268.
- CIAIS P, REICHSTEIN M, VIOVY N, GRANIER A, OGÉE J, ALLARD V, AUBINET M, BUCHMANN N, BERNHOFER C, CARRARA A, CHEVALLIER F, DE NOBLET N, FRIEND AD, FRIEDLINGSTEIN P, GRÜNWARD T, HEINESCH B, KERONEN P, KNOHL A, KRINNER G, LOUSTAU D, MANCA G, MATTEUCCI G, MIGLIETTA F, OURCIVAL JM, PAPAIE D, PILEGAARD K, RAMBAL S, SEUFERT G, SOUSSANA JF, SANZ MJ, SCHULZE ED, VESALA T, VALENTINI R (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529–533.
- CLARKE R (1991) Water – the International Crisis, Earthscan Publications with Swedish Red Cross, London ISBN 1853831050.
- CLAUSEN B, PEARSON CP (1995) Regional Frequency Analysis of Annual Maximum Streamflow Drought, *Journal of Hydrology*, 173, 111-130.
- CLOPPET E (2011) Agricultural Drought Indices in France and Europe: Strengths, Weaknesses, and Limitations. In: SIVAKUMAR MVK, RAYMOND PM, DONALD AW, WOOD DA (Hrsg.) *Agricultural Drought Indices. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11,WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 197.* (http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_agricultural_drought_indices_proceedings_2010.pdf; abgerufen am 17.10.2014)
- CONEDERA M. (2003): Trockenheit, In: OcCC Bericht: Extremereignisse und Klimaänderung, Bern. (http://www.occ.ch/reports/extremereignisse03/PDF_D/9-00.pdf; abgerufen am 13.10.2014)
- COUGHLAN MJ (1987) Monitoring drought in Australia. In *Planning for Drought: Toward a Reduction of Societal Vulnerability*. In: DA WILHITE und WE EASTERLING (Hrsg.) West view Press, Boulder, Colorado, pp. 131-144.
- COULTER JD (1973) A water balance assessment of New Zealand rainfall. *New Zealand Journal of Hydrology*, 12: 83-91.
- CUTTER SL [Hrsg.] (2001) *American Hazardscapes: The Regionalization of Hazards and Disasters. – Natural Hazards and Disasters Series, 211 S.*
- DAI A (2011) Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. *J. Geophys. Res.*, 116, D12115, doi:10.1029/2010JD015541.
- DAI A, TRENBERTH KE, QIAN T (2004) A global dataset of Palmer drought severity index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorol.*, 5, 1117–1130.

- DAI A, QIAN T, TRENBERTH KE, MILLIMAN JD (2009) Changes in continental freshwater discharge from 1948–2004. *J. Climate*, 22, 2773–2791.
- DALE RF (1964) Weather effects on experimental plot corn yields: Climatology of selected favorable and unfavorable conditions. Ph.D. thesis. Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, USA.
- DALE RF (1968) The climatology of soil moisture, evaporation, and non-moisture stress days for corn in Iowa. *Agricultural Meteorology* 5:111-128.
- DALE RF, SHAW RH (1965) The climatology of soil moisture, atmospheric evaporative demand and resulting moisture stress days for corn at Ames, Iowa. *Journal of Applied Meteorology* 4:661-669.
- DENMEAD OT, SHAW RH (1962) Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy Journal* 45:385-390.
- DIETZER B (2001) Langzeitverhalten extremer Niederschlagsereignisse – Ergebnisse aus KLIWA. In: Klima-Veränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft – Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe (Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA). KLIWA-Berichte, Heft 1, Karlsruhe (<http://www.kliwa.de/download/symp2000/vortrag05.pdf>; abgerufen am 01.10.2014)
- DIODATO N, BELLOCCHI G (2008) Drought stress patterns in Italy using agro-climatic indicators, *Climate Research* 36, 53-63
- DÖRING S (2010) Vergleich von Trockenheitsindizes zur Nutzung in der Landwirtschaft unter den klimatischen Bedingungen Mitteldeutschlands. - Dipl.arb., Univ. Halle-Wittenberg.
- DOESKEN NJ, MCKEE TB, KLEIST J (1991) Development of a surface water supply index for the Western United States. *Climo Report* 91-3, Dept. of Atmos. Sci., CSU, Fort Collins, CO, November, 80 pp. (http://climate.atmos.colostate.edu/pdfs/climo_rpt_91-3.pdf; abgerufen am 13.10.2014)
- DONNELLY JR, FREER M, MOORE AD (1998) Using the GrassGro decision support tool to evaluate some objective criteria for the definition of exceptional drought. *Agricultural Systems* 57:301-313.
- DONOHUE RJ, MCVICAR TR, RODERICK ML (2010) Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *J. Hydrol.*, 386, 186–197.
- DOORENBOS J, PRUITT WO (1977) Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAQ Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization, Rome.
- DRACUP JA, LEE KS, PAULSON EG Jr. (1980) On the definition of droughts. *Water Resources Research* 16 (2): 297–302.
- DVWK (Hrsg.) (1996) Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Merkblatt M 238
- DVWK (Hrsg.) (2002) Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Merkblatt M 504
- EDWARDS DC, MCKEE TB (1997) Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report Number* 97-2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. (<http://ccc.atmos.colostate.edu/edwards.pdf>; abgerufen am 01.10.2014)
- ELAGIB NA, ELHAG MM (2011) Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology*, 409 (3–4), 612–625
- FAO (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome. Irrigation and Drainage Paper 56.
- FARAJALLA N, ZIADE R (2010) Drought frequency under a changing climate in the Eastern Mediterranean: the Beka'a Valley, Lebanon. *Geophysical Research Abstracts*, 12 (2010) EGU2010–11653
- FERNANDEZ B, SALAS JD (1999) Return period and risk of hydrologic events II, *J. Hydrol. Eng.*, 4(4), 297–307.
- FIORILLO F, GUADAGNO FM (2010) Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI. *Water Resour. Manage.*, 24, 1867–1884.
- FLEIG AK, TALLAKSEN LM, HISDAL H, HANNAH DM (2011): Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area. - *Hydrol. Process.* 25, 1163–1179, DOI: 10.1002/hyp.7644.

- FOLEY JC (1957) Drought in Australia. Bureau of Meteorology, Bulletin No. 43, Melbourne.
- FRANKE J (2013) EXTRA – Programm-gesteuerte Extrahierung von Rasterzellen-bezogenen Zeitreihen aus (Bay)RaKliDa-Output. Dokumentation, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, 12 S.
- FRERE M, POPOV GF (1979) Agro meteorological Crop Monitoring and Forecasting, Plant Production and Protection Paper 17, FAO, Rome. (Zitiert in SMAKHTIN & HUGHES 2004)
- FREYDANK E (2001) Statistische Untersuchungen Regionaler Klimatrends in Sachsen. Radebeul, DWD, Regionales Gutachterbüro Dresden.
- FRICH P, ALEXANDER LV, DELLA-MARTA PM, GLEASON B, HAYLOCK M, KLEIN TANK AMG, PETERSON T (2002) Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. - *Climate Research*, 19(3), 193-212.
- FRIEDMAN DG (1957) The prediction of long-continuing drought in south and southwest Texas. Occasional Papers in Meteorology, No. 1, The Travelers Weather Research Center, Hartford, CT, 182 pp.
- GAGE SH (2003) Climate variability in the North Central Region: characterizing drought severity patterns. In: GREENLAND D, GOODIN DG, SMITH RC (Hrsg.) *Climate variability and ecosystem responses at long-term ecological research site*. Oxford University Press, Oxford, p 56–73
- GAGE SH, MUKERJI MK (1977) A perspective of grasshopper population distribution in Saskatchewan and interrelationships with weather. *Environ Entomol* 6:469–479
- GAO BC (1996) NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 58 (3): 257–266. doi:10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- GATHARA ST, GRINGOF LG, MERSHA E, SINHA RAY KC, SPASOV P (2002) Report of the CAgM working group on the impacts of desertification and drought and of other extreme meteorological events. WMO—Commission for Agricultural Meteorology, Geneva
- GEORGE CJ, RAMASASTRY WS (1975) Agricultural drought of 1972 kharif season. *Indian Journal of Meteorology, Hydrology and Geophysics* 26:89-96.
- GEVAERD R, FREITAS SR (2006) Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: Descrição da metodologia e validação. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21:59-73. (Zitiert von SIVAKUMAR et al. 2011)
- GHULAM A, LI Z-L, QIN Q, TONG Q. (2007a) Exploration of the spectral space based on vegetation index and albedo for surface drought estimation. *J. Appl. Remote Sens.*, 1, 013529.
- GHULAM A, QIN Q, ZHAN Z (2007b). Designing of the perpendicular drought index. *Environ. Geol.*, 52: 1045-1052.
- GHULAM A, QIN Q, TEYIP T, LI Z-L (2007c). Modified perpendicular drought index (MPDI): A real-time drought monitoring method. *J. Photogramm. Remote Sens.*, 62: 150-164.
- GIBBS WJ, MAHER JV (1967) Rainfall deciles as drought indicators. *Bulletin (Australia. Bureau of Meteorology)* 48. Melbourne: Bureau of Meteorology.
- GOBRON N, PINTY B, MÉLIN F, TABERNER M, VERSTRAETE MM, BELWARD A, LAVERGNE T, WIDLOWSKI J-L (2005) The state of vegetation in Europe following the 2003 drought. *International Journal Remote Sensing Letters*, 26 (9): 2013-2020.
- GOBRON N, PINTY B, MÉLIN F, TABERNER M, VERSTRAETE MM, ROBUSTELLI M, WIDLOWSKI J-L (2007) Evaluation of the MERIS/ENVISAT fAPAR Product. *Advances in Space Research* 39: 105-115.
- GOMMES R, PETRASSI F (1994) Rainfall variability and drought in Sub-Saharan Africa since 1960. *Agrometeorology series working paper 9*, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- GONZÁLEZ J, VALDÉS J (2006) New drought frequency index: Definition and comparative performance analysis. *Water Resour. Res.* 42 (11): W11421. doi:10.1029/2005WR004308.
- GRISSINO-MAYER HD, FRITTS HC (1997) The International Tree-Ring Data Bank: An enhanced global database serving the global scientific community. *Holocene*, 7, 235–238.

- GUMBEL EJ (1963) Statistical forecast of droughts. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.* 8 (1), 5.23.
- GUTMAN G (1990) Towards monitoring droughts from space. *J. Climate*, 3: 282-295.
- GUTTMAN NB (1994) On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of Climatology* 7: 1026–1029.
- GUTTMAN NB (1998) Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, 34, 113–121.
- GUTTMAN NB (1999) Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, 35, 311–322.
- GUTTMAN NB, WALLIS JR, HOSKING JRM (1992) Spatial comparability of the Palmer drought severity index. *Water Resour. Bull.*, 28, 1111–1119.
- GYALISTRAS D (2000) Trockenheit in der Schweiz: Trends im 20. Jahrhundert und Szenarien für die Zukunft. - Unterlagen zum OcCC/ProClim- Workshop vom 4. April 2000 in Bern.
- HANE DC, PUMPHREY FV (1984) Crop Water Use Curves for Irrigation Scheduling. Agricultural Experiment Station, Oregon State University, Corvallis.
- HANIGAN IC, BUTLER CD, KOKIC PN, HUTCHINSON MF (2012) Suicide and Drought in New South Wales, Australia, 1970-2007. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, vol. 109 no. 35 13950-13955, doi: 10.1073/pnas.1112965109.
- HANNAFORD J, LLOYD-HUGHES B, KEEF C, PARRY S & PRUDHOMME C (2011) Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of rainfall and streamflow deficit. - *Hydrol. Processes*, 25, 1146–1162, doi:10.1002/hyp.7725.
- HÄNSEL S (2014) Introducing the Decile Concept for Studying the Spatiotemporal Characteristics and Variability of Long-Lasting Dry and Wet Periods. *Theoretical and Applied Climatology* 118 (1-2): 223–35. doi:10.1007/s00704-013-1044-4.
- HÄNSEL S, SCHUCKNECHT A, MATSCHULLAT J (2014) The modified Rainfall Anomaly Index (mRAI) – An alternative to the Standardized Precipitation Index (SPI) in evaluating future extreme precipitation characteristics? (submitted to *Theoretical and Applied Climatology*)
- HARDISKY M, KLEMAS V, SMART R (1983) The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 49: 77–83.
- HARLFINGER O, KNEES G (1999) *Klimahandbuch der Österreichischen Bodenschätzung, Teil 1: Klimatographie.* - Wagner, Innsbruck.
- HAYES MJ, SVOBOHA MD, WILHITE DA, VANYARKHO OV (1999) Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 429-438.
- HAYES MJ (2000) Drought indices. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska. (<http://www.civil.utah.edu/~cv5450/swsi/indices.htm>; abgerufen am 09.10.2014)
- HAYES M, SVOBODA M, WALL N, WIDHALM M (2011) The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92, 485–488. doi: (<http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>; aufgerufen am 20.12.2014)
- HEDDINGHAUS TR, SABOL P (1991) A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here? In *Proc. 7th Conf. on Applied Climatology*, pp. 242–246. American Meteorological Society, Boston.
- HEIM RR Jr. (2002) A review of twentieth-century drought indices used in the United States. - *Bull. Am. Meteor. Soc.* 83 (8), 1149–1165.
- HEIM RR Jr., BREWER MJ (2012) The Global Drought Monitor Portal: The Foundation for a Global Drought Information System. *Earth Interact.*, 16, 1–28. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2012EI000446.1>
- HEINRICH G, GOBIET A (2012) The future of dry and wet spells in Europe: a comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models. *International Journal of Climatology* 32:1951–1970. doi: 10.1002/joc.2421

- HENRY AJ (1906) Climatology of the United States. Bulletin Q. U.S. Weather Bureau Bulletin. 361, Washington, DC, 51-58. (digitalisierte Version unter <https://archive.org/details/climatologyofuni00henruoft> abrufbar; zugegriffen am 13.10.2014)
- HERBST PH, BREDENKAMP DB, BARKER HMG (1966) A technique for the evaluation of drought from rainfall data. *J. Hydrol.* 4(4), 264-272.
- HISDAL H, TALLAKSEN LM [eds] (2000) Drought Event Definition. ARIDE Technical Report no. 6. University of Oslo, Oslo, Norway. (<http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/aride/navigation/publications/pdfs/aride-techrep6.pdf>; abgerufen am 08.10.2014)
- HOLLINGER SE, ISARD SA, WELFORD MR (1993) A new soil moisture drought index for predicting crop yields. In: Preprints Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim (CA), 17-22 January 1993. AMS, pp. 187-190.
- HOYT JC (1936) Droughts of 1930-34, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 680, 106 p (pdf-Version verfügbar unter <http://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp680>; zugegriffen am 13.10.2014)
- HUETE A, JACKSON R, POST D (1985) Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.* 17 (1): 37–53. doi:10.1016/0034-4257(85)90111-7.
- HUETE A, DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ EP, GAO X, FERREIRA LG (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83:195-213.
- HUDSON HE, HAZEN R (1964) Drought and low streamflow. In: CHOW VT (Hrsg.) *Handbook of Applied Hydrology*, Mc-Graw-Hill, New York, Kap. 18.
- HUNT ED, HUBBARD KG, WILHITE DA, ARKEBAUER TJ, DUTCHER AL (2009) The development and evaluation of a soil moisture index. *Int. J. Climatol.* 29 (5), 747–759.
- IDSO S, JACKSON R, PINTER P Jr, REGINATO R, HATFIELD J (1981) Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24: 45–55. doi:10.1016/0002-1571(81)90032-7.
- JACKSON RD, IDSO SB, BEGINATO RJ, PINTER PJ Jr. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17: 1133-1138.
- JENSEN ME, BURMAN RD, ALLEN RG (1990) *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, Am. Soc. Civil Engr., New York, NY, 332 pp.
- Ji L, PETERS AJ (2003) Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sens. Environ.*, 87, 85–98.
- KALLIS G (2008) Droughts. *Annual Review of Environment and Resources* 33 (1): 85–118. doi:10.1146/annurev.environment.33.081307.123117.
- KARAMOUZ M, RASOULI K, NAZIF S (2009) Development of a hybrid index for drought prediction: case study. *J. Hydrol. Eng.* 14 (6): 617–627. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000022.
- KARL TR (1983) Some spatial characteristics of drought duration in the United States. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1356–1366.
- KARL TR (1986) The sensitivity of the Palmer drought severity index and the Palmer Z index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 77–86.
- KARL TR, KNIGHT RW (1985) *Atlas of Monthly Palmer Hydrological Drought Indices (1931-1983) for the Contiguous United States*. Historical Climatology Series 3-7, National Climatic Data Center, Asheville, North Carolina (<http://uc.bookprep.com/read/uc1.31822006846174>; Zugegriffen am 02.10.2014)
- KARL TR, QUINLAN F, EZELL DD (1987) Drought termination and amelioration: Its climatological probability. *J. Climate Appl. Meteor.*, 26, 1198–1209.
- KARL TR, NICHOLLS N, GHAZI A (1999) CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, 42, 3-7.
- KATZ RW, GLANTZ MH (1986) Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather Review*, 114, 764–771.
- KAYSER M (2002) *Aspekte zum Wasserhaushalt von Sandlössen im Mitteldeutschen Trockengebiet*. Dissertation an der Technischen Universität Berlin.

- KEETCH JJ, BYRAM GM (1968) A drought index for forest fire control. – US Dept. of Agriculture, Forest Service Research Paper SE-38, 32 pp.
- KEYANTASH J, DRACUP JA (2002) The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. Bulletin American Meteorological Society, August 2002, 1167-1180. doi: 10.1175/1520-0477(2002)29083%3C1191%3ATQODAE%3E2.3.CO%3B2
- KEYANTASH JA, DRACUP JA (2004) An Aggregate Drought Index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. Water Resources Res., 40, W09304.
- KHALILI D, FARNOUD T, JAMSHIDI H, KAMGAR-HAGHIGHI AA, ZAND-PARSA S (2011) Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. Water Resources Management, 25 (6), 1737–1757
- KHAN S, GABRIEL HF, RANA T (2008) Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. Irrig. Drain. Syst., 22, 159–177. doi: 10.1007/s10795-008-9049-3
- KININMONTH WR, VOICE ME, BEARD GS, DE HOEDT GC UND MULLEN CE (2000) Australian climate services for drought management. In: Drought, a global assessment. DA WILHITE (Hrsg.), Routledge, pp. 210-222.
- KIRONO DGC, KENT DM, HENNESSY KJ, MPELASOKA F (2011) Characteristics of Australian droughts under enhanced greenhouse conditions: results from 14 global climate models. Journal of Arid Environments, 75 (6), 566–575
- KLIWA (2006): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. – KLIWA-Bericht 8, 95 S. (<http://www.kliwa.de/download/KLIWAHeft8.pdf>; zugegriffen am 13.10.2014)
- KÖNIG C, MAYER H (1989) Klimastatistik, Bearbeitung im Hinblick auf neuartige Waldschäden. Wissenschaftliche Mitt. 64, Meteorologisches Institut, Univ. München, Münchner Universitätsschriften, 646 S.
- KOGAN FN (1990) Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. Int. J. Remote Sens., 11: 1405-1419.
- KOGAN FN (1995a) Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. Bulletin of the American Meteorological Society 76(5): 655-668. doi: 10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2
- KOGAN FN (1995b) Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Adv. Space Research, 11: 91-100. doi:10.1016/0273-1177(95)00079-T.
- KOGAN FN (1997) Global drought watch from space. Bull. Am. Soc. Met., 78: 621-636.
- KOGAN, F.N. 2001. Operational Space Technology for Global Vegetation Assessment. Bull. Am. Meteorol. Soc. 82 (9): 1949–1964. doi:10.1175/1520-0477(2001)082<1949:OSTFGV>2.3.CO;2.
- KOUSARI MR, DASTORANI MT, NIAZI Y, SOHEILI E, HAYATZADEH M, CHEZGI J (2014) Trend Detection of Drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran Based on Implementation of Reconnaissance Drought Index (RDI) and Application of Non-Parametrical Statistical Method. Water Resources Management 28(7): 1857-1872
- KREIENKAMP F, SPEKAT A, ENKE W (2011) KLI-WETT – Klimawandel und Wetterlagen. Einfluss auf Witterungsextreme und die Immissionssituation in Sachsen. Bericht Phase I. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- KUHNKE A (1936): Die Abhängigkeit des Pflanzenertrages von der Wasserverdunstung. - Schr. Königsberger Gelehrten Ges. 13: 59 – 158.
- KUMAR V, PANU US (1997) Predictive assessment of severity of agricultural droughts based on agro-climatic factors. J. Am. Wat. Resour. Assoc. 33(6), 1255-1264.
- LANDSBERG HE (1982) Climatic aspects of droughts. Bulletin American Meteorological Society 63, 593-596.
- LAWRIMORE J, HEIM RR JR, SVOBODA M, SWAIL V, ENGLEHART PJ (2002) Beginning a new era of drought monitoring across North America. Bulletin of the American Meteorological Society 83(8):1191-1192.
- LEATHERS DJ (1997) An evaluation of severe soil moisture droughts across the northeast United States. Preprints, 10th Conf. on Appl. Climatology, Reno, NV, Amer. Meteor. Soc., 326–328.

- LEATHERS DJ, ROBINSON DA (1995) A water resource monitoring system for the northeast United States: An historical overview 1895–1994. Preprints, Ninth Conf. on Applied Climatology, Dallas, TX, Amer. Meteor. Soc., 249–252. (http://climate.rutgers.edu/stateclim_v1/robinson_pubs/non_refereed/Leathers_and_Robinson_1995_a_water.pdf; zugegriffen am 17.10.2014)
- LESPINAS F, LUDWIG W, HEUSSNER S (2010) Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change*, 99, 425–456. doi: 10.1007/s10584-009-9668-1
- LIANG S, GE S, WAN L, ZHANG J (2010) Can climate change cause the Yellow River to dry up? *Water Resour. Res.*, 46, W02505, doi:10.1029/2009WR007971.
- LINARES JC, CAMARERO JJ (2011) From pattern to process: Linking intrinsic water-use efficiency to drought-induced forest decline. *Global Change Biol.*, 18, 1000–1015, doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02566.x.
- LINSELY JR. RK, KOHLER MA, PAULHUS JLH (1959) *Applied Hydrology*. McGraw Hill, New York. (zitiert in MISHRA & SINGH 2010)
- LIU L, XIANG D, DONG X, ZHOU Z (2008) Improvement of the drought monitoring model based on the cloud parameters method and remote sensing data. In: Proc. of the Int. Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining, 23-24 Jan. 2008, Adelaide (Australia), pp. 293-296.
- LLOYD-HUGHES B, SAUNDERS MA (2002) A drought climatology for Europe. *Int. J. Climatol.* 22, 1571–1592.
- LÓPEZ-MORENO JI, VICENTE-SERRANO SM, ZABALZA J, BEGUERÍA S, LORENZO-LACRUZ J, AZORIN-MOLINA C, MORÁN-TEJEDA E (2013) Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology* 477: 175–88. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.11.028.
- LORENZO-LACRUZ J, VICENTE-SERRANO SM, LÓPEZ-MORENO JI, BEGUERÍA S, GARCÍA-RUIZ JM, CUADRAT JM (2010) The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *J. Hydrol.*, 386, 13–26. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.01.001
- LOUKAS A, MYLOPOULOS N, VASILIADES L (2007) A modeling system for the evaluation of water resources management strategies in Thessaly, Greece. *Water Resources Management* 21 (10): 1673–1702.
- LU E (2011) A Method for Monitoring Meteorological Drought at Daily Scale, Science and Technology Infusion Climate Bulletin, NOAA's National Weather Service, 36th NOAA Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop, Fort Worth, TX, 3-6 October 2011
- LYON B (2004) The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought. *Geophysical Research Letters*, 31, L21204.
- MACK AR, FERGUSON WS (1968) A moisture stress index for wheat by means of a modulated soil moisture budget. *Canadian Journal of Plant Science* 48:535-543.
- MADSEN H, MIKKELSEN PS, ROSBJERG D, HARREMOES P (1998) Estimation of regional intensity-duration-frequency curves for extreme precipitation. *Water Sci. Technol.* 37 (11), 29–36.
- MANIAK U (2005) *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure*. 5. Aufl., Springer, Berlin, 666 S.
- MARACCHI G (2000) Agricultural drought – a practical approach to definition, assessment and mitigation strategies. In: JJ VOGT & F SOMMA (Hrsg.). *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer, Dordrecht. pp 63-75.
- MARCOVITCH S (1930) The measure of droughtiness. *Mon. Wea. Rev.*, 58, 113.
- MARLETTO V, ZINONI F, BOTARELLI L, ALESSANDRINI C (2005) Studio dei fenomeni siccitosi in Emilia-Romagna con il modello di bilancio idrico CRITERIA. *Riv. Agrometeorologia*, 10(1): 32-33.
- MARTÍNEZ-VILLALTA J, LÓPEZ BC, ADELL N, BADIELLA L, NINYEROLA M (2008) Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions. *Global Change Biol.*, 14, 2868–2881. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01685.x
- MARTONNE DE E (1926) Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité, *Bull. Ass. Geogr. De France*, Vol. IX.

- MATERA A, FONTANA G, MARLETTO V (2007) Use of a new agricultural drought index within a regional drought observatory. In: ROSSI G [Hrsg.] *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. pp. 103–124.
- MAVROMATIS T (2007) Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. *International Journal of Climatology* 27(7): 911–924. doi: 10.1002/joc.1444
- MAYBANK J, BONSAI B, JONES K, LAWFORD R, O'BRIEN EG, RIPLEY EA, WHEATON E (1995) Drought as a natural disaster. *Atmosphere-Ocean*, 33(2), 195–222. doi: 10.1080/07055900.1995.9649532 (<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07055900.1995.9649532>, abgerufen am 02. Oktober 2014)
- MCDONALD CK (1994) Calculating climatic indices affecting plant growth. Tropical Agronomy Technical Memorandum No. 83, CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane, Queensland, Australia. (<https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=procite:13d13b07-e584-48d8-817e-fa6b49140998&dsid=DS1>; abgerufen am 13.10.2014)
- MCGUIRE JK & PALMER WC (1957) The 1957 drought in the eastern United States. - *J. Mon. Wea. Rev.* , 1957, 85: 305- 314.
- MCKEE TB, DOESKEN NJ, KLEIST J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 179-184. January 17-22, Anaheim, California (http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/pdf/paper_spi.pdf; abgerufen am 01.10.2014)
- MCKEE TB, DOESKEN NJ, KLEIST J (1995) Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, 9th Conference on Applied Climatology, 233-236. January 15-20, Dallas, Texas
- MCMAHON TA, ARENAS AD (1982) Methods of computation of low streamflow. Paris, UNESCO Studies and reports in hydrology 36, 107 pp. (<http://unesdoc.unesco.org/images/0005/000512/051290eo.pdf>; abgerufen am 01.10.2014)
- MCQUIGG J (1954) A simple index of drought conditions. *Weatherwise*, 7, 64–67. (zitiert in Heim 2002)
- MCVICAR TR, BIERWIRTH PN (2001) Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. *Int. J. Remote Sens.* 22: 2109-2128.
- MCVICAR TR, JUPP DLB (1998) The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on Drought Exceptional Circumstances in Australia: A review. *Agricultural Systems* 57(3):399-468.
- MCVICAR TR & JUPP DLB (2002) Using covariates to spatially interpolate moisture availability in the Murray–Darling Basin: A novel use of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment, Recent Advances in Remote Sensing of Biophysical Variables*, 79(2–3): 199–212. doi:10.1016/S0034-4257(01)00273-5.
- MECIKALSKI JM, DIAK GR, ANDERSON MC, NORMAN JM (1999) Estimating fluxes on continental scales using remotely sensed data in an atmospheric–land exchange model. *J. Appl. Meteor.*, 38, 1352–1369.
- MEHLER S, VÖLLINGS A, FLÜGEL I, SZYMANOWSKI M, BŁAŚ M, SOBIK M, MIGAŁA K, WERNER M, KRYZA M, MISZUK B, OTOPI I, KOLANEK A, STROŃSKA M; LFULG (HRSG.) (2014) *Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum. Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum*, Dresden, 80 S.
- MEKO D, COOK ER, STAHL DW, STOCKTON CW, HUGHES MK (1993) Spatial patterns of tree-growth anomalies in the United States and southeastern Canada. *J. Climate*, 6, 1773–1786. doi: 10.1175/1520-0442(1993)006<1773:SPOTGA>2.0.CO;2
- MENDICINO G, SENATORE A, VERSACE P (2008) A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate. *J. Hydrol. (Amst.)*, 357 (3–4): 282–302. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.05.005.
- MESHCHERSKAYA AV, BLAZHEVICH VG (1997) The Drought and Excessive Moisture Indices in a Historical Perspective in the Principal Grain-Producing Regions of the Former Soviet Union. *Journal of Climate* 10(10): 2670–82. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<2670:TDAEMI>2.0.CO;2.
- MESHCHERSKAYA AV, BLAZHEVICH VG, BELYANKINA IG (1981) Comparison of the two heat–moisture availability indices for the crop production. *Proc. Main Geophys. Observatory*, 446, 68–77.

- Meteorologischer und Hydrologischer Dienst der DDR (Hrsg.; 1953): Klimaatlas für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik, Erläuterungen. Akademie-Verlag, Berlin.
- METTE T, RÖTZER T, PRETZSCH H (2011) Ein Dürre-Index für die Forstwirtschaft. LWF aktuell 85: 19-21. (http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de/info/publications/OnlinePublications/2011_Duerre_Mette_Roetzer.pdf; abgerufen am 02.10.2014)
- MEYER SJ, HUBBARD KG (1995) Extending the Crop Specific Drought Index to soybean. In: Preprints Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Dallas (TX), 15-20 January 1995. AMS, pp. 258-259.
- MEYER JL, PULLIAM WM (1992) Modification of terrestrial-aquatic interactions by a changing climate. In: FIRTH P, FISHER SG (Hrsg.) Global climate change and freshwater ecosystems. Springer, New York, pp 177–191
- MEYER SJ, HUBBARD KG, WILHITE DA (1993) A crop specific drought index for corn. Part 1. Model development and validation. Agron. J. 85: 388-395.
- MISHRA AK, SINGH VP (2009) Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. J. Geophys. Res. 114, D06120. doi:10.1029/2008JD010986.
- MISHRA AK, SINGH VP (2010) A review of drought concepts. J. Hydrol., 391, 202–216. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012
- MOLINAS PA, ANDRADE FCM (1993) Modelo de umidade do solo para atividades agrícolas. Pages 136-145 in Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, SBRH, Gramado, Brasil. (Zitiert von SIVAKUMAR et al. 2011)
- MONTHEITH JL (1965) Evaporation and environment. – In GOGG, G.E. (Hrsg.): Symposium of the Society for experimental biology, The State and Movement of Water in Living Organisms, Vol. 19, 205-234.
- MORAN MS (2003) Thermal infrared measurement as an indicator of plant ecosystem health. In: DA QUATTROCHI & J LUVALL (Hrsg.) Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes, Taylor and Francis, 257–282.
- MORAN MS, CLARKE TR, INOUE Y, VIDAL A (1994) Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote sensing of environment 46, 246-263.
- MORID S, SMAKHTIN V, MOGHADDASI M (2006) Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. International Journal of Climatology 26: 971-985. doi: 10.1002/joc.1264
- MOSLEY P, PEARSON C (Hrsg.; 1997) Floods and droughts: the New Zealand experience. Christchurch, New Zealand Hydrological Society.
- MÜHLETHALER C (2004) Analyse von Trockenperioden im 20. Jahrhundert in der Schweiz. Publikationen Gewässerkunde Nr. 309, Gruppe für Hydrologie, Geographisches Institut der Universität Bern
- MÜLLER J, JÖRN P, THIÈRE J (1995) Erarbeitung einer Karte der pflanzennutzbaren Feldkapazität für die neuen Bundesländer. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 76, S. 1149-52.
- MÜLLER J, BÖTTCHER F, SCHMIDT M (2008) Bestimmung bodenartabhängiger Klimafeuchtezahlen für verschiedene Standorte in mittleren und nordöstlichen Regionen Deutschlands. - Hercynia N.F. 41: 189 – 200.
- MÜLLER-WESTERMEIER G (2000) Die mittleren klimatologischen Bedingungen in Deutschland (Teil III). In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) Klimastatusbericht 1999, Deutscher Wetterdienst, Offenbach (http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU22/klimastatusbericht/einzelne__berichte/download__ksb1999,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/download_ksb1999.pdf; abgerufen am 02.10.2014)
- MUNGER TT (1916) Graphic method of representing and comparing drought intensities. Mon. Wea. Rev. 44, 642–643.
- NALBANTIS I (2008) Evaluation of a Hydrological Drought Index. European Water 23/24: 67–77.
- NALBANTIS I, TSAKIRIS G (2009) Assessment of Hydrological Drought Revisited. Water Resources Management 23(5): 881-897.

- NARASIMHAN B, SRINIVASAN R (2005) Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133: 69-88. doi: 10.1016/j.agrformet.2005.07.012
- NCDC 2010 NCDC. 2010. U.S. Palmer Drought Indices. National Climatic Data Center. <<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/prelim/drought/palmer.html>> (accessed 22 April 2011; zitiert von ZARGAR et al. 2011)
- NEITSCH SL, ARNOLD JG, KINIRY JR, WILLIAMS JR, KING KW (2002) Soil and water assessment tool, Theoretical documentation: Version 2000. TWRI TR-191. Texas Water Resources Institute, College Station, TX (<http://swat.tamu.edu/media/1290/swat2000theory.pdf>; abgerufen am 17.10.2014)
- NIEMEYER S (2008): New drought indices. *Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens* 80, p. 267-274, CIHEAM-IAMZ
- NOBILIS F (1980) Extreme Trockenperioden im Jahr in Österreich. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Set. B*, 28, S. 339-349. doi: 10.1007/BF02245363
- NTALE HK, GAN TV (2003) Drought indices and their application to East Africa. *International Journal of Climatology* 23: 1335-1357. doi: 10.1002/joc.931
- OcCC (2000): Trockenheit in der Schweiz, Workshopbericht, 04.04.2000, Bern. (<http://www.occ.ch/reports/Trockenheit00/trockenheit.pdf>; abgerufen am 13.10.2014)
- OLAPIDO EO (1985) A comparative performance of three meteorological drought indices. *Journal of Climatology*, 5, 655-664. doi: 10.1002/joc.3370050607
- ORWIG DA, ABRAMS MD (1997) Variation in radial growth responses to drought among species, site, and canopy strata. *Trees Struct. Funct.*, 11, 474–484. doi: 10.1007/s004680050110
- PÁLFAI I (1991) Az 1990 évi aszály Magyarországon. *Vízügyi Közlemények*, 2: 117–132.
- PALMER WC (1965) Meteorological drought. Research Paper No. 45. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce Weather Bureau (<https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>; abgerufen am 01.10.2014)
- PALMER WC (1968) Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new Crop Moisture Index. *Weatherwise* 21:156–161.
- PASHO E, CAMARERO J, DE LUIS M, VICENTE-SERRANO SM (2011) Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agric. For. Meteorol.*, 151, 1800–1811. doi: 10.1016/j.agrformet.2011.07.018
- PAULO AA, PEREIRA LS (2006) Drought concepts and characterization: Comparing drought indices applied at local and regional scales. *Water Int.*, 31, 37–49. doi: 10.1080/02508060608691913
- PED DA (1975) Index of drought and excessive moisture. - *Proc. Hydrometcentra USSR*, vol 156, pp 19–38
- PEREIRA LS, PAULO AA (2004) Droughts: Concepts, Indices and Prediction. In: HAMDY A & TRISORIO-LIUZZI G, *Water Management for Drought Mitigation in the Mediterranean*, *Options Méditerranéennes, Série B n. 47*. Bari: CIHEAM (Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes), p. 328
- PETERSON TC, FOLLAND CH, GRUZA G, HOGG W., MOKSSIT A, PLUMMER N (2001) Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001. WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland, 143pp. (<http://etccdi.pacificclimate.org/docs/wgccd.2001.pdf>; abgerufen am 01.10.2014)
- PETRASOVITS I (1990) General Review on Drought Strategies. In *Transactions of the 14th Congress on Irrigation and Drainage*, Rio de Janeiro, Vol. 1-C, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 1-12. (Zitiert von SMAKHTIN & HUGHES 2004)
- PHILLIPS ID, MCGREGOR GR (1998) The utility of a drought index for assessing the drought hazard in Devon and Cornwall, South West England. *Meteorological Applications*, 5: 359-372. doi: 10.1017/S1350482798000899

- PIETZSCH S, BISSOLLI P (2011) A modified drought index for WMO RA VI, *Adv. Sci. Res.*, 6, 275-279, doi:10.5194/asr-6-275-2011.
- PIOVESAN G, BIONDI F, DI FILIPPO A., ALESSANDRINI A, MAUGERI M (2008) Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Global Change Biol.*, 14, 1265–1281. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01570.x
- PLAPP T (2003) Wahrnehmung von Risiken aus Naturkatastrophen. Eine empirische Untersuchung in sechs gefährdeten Gebieten Süd- und Westdeutschlands. - Diss. Uni-Karlsruhe, 349 S. (<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/3542003>, zugegriffen am 13.10.2014).
- PORTEOUS AS, BASHER RE, SALINGER MJ (1994). Calibration and performance of a single-layer soil water balance model for pasture sites. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 37: 107-118.
- PRESCOTT JA (1948) „A Climatic Index for the Leaching Factor in Soil Formation“. *Journal of Soil Science* 1, Nr. 1 (1. Januar 1950): 9–19. doi:10.1111/j.1365-2389.1950.tb00714.x.
- PRUDHOMME C, SAUQUET E (2007) Modelling a regional drought index in France. Centre for Ecology & Hydrology, Natural Environment Research Council, Wallingford, UK and Cemagref, France, 54 pp.
- QUIRING SM (2009) Developing objective operational definitions for monitoring drought. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 1217–1229. doi: 10.1175/2009JAMC2088.1
- QUIRING, SM, GANESH S (2010) Evaluating the utility of the vegetation condition index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agric. For. Meteorol.*, 150, 330–339. doi: 10.1016/j.agrformet.2009.11.015
- QUIRING SM, PAPA KRYIAKOU TN (2003) An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agric. For. Meteorol.*, 118, 49–62. doi: 10.1016/S0168-1923(03)00072-8
- RAMANA RAO BV, SASTRI ASRAS, RAMA KRISHNA YS (1981) An Integrated Scheme of Drought Classification as Applicable to Indian Arid Region, *IDOJARAS* 85:317-22, (zitiert von SASTRI 1993).
- RAMDAS DA (1950) Rainfall and Agriculture, *Ind. J. Met and Geophys.* 1(4): 262-274, zitiert von WMO (1974).
- RAMDAS DA (1960) Crops and weather in india. ICAR, New Delhi, India (zitiert in WILHITE & GLANTZ 1985).
- RAO AS, SAXTON KE (1995) Analysis of profile soil water and water stress under pearl millet in an Indian arid region using the SPAW model. - *Journal of Arid Environments* 29:155–67.
- RAO AR, VOELLER TL (1997) Development and testing of drought indicators. *Water Resources Management*, 11: 119-136.
- REDMOND KT (2002) The depiction of drought. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1143–1147. javascript:newWindow('http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477%282002%29083%3C1143%3ATDODAC%3E2.3.CO%3B2')
- REICHEL E (1928) Der Trockenheitsindex, insbesondere für Deutschland. - In: Preussisches Meteorologisches Institut (Hrsg.): 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.
- RENGER M, WESSOLEK G (1990) Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung. – Mit. Inst. für Wasserwesen, Univ. der Bundeswehr München, 386: 295-307.
- RICHTER D (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 194, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.
- RITCHIE JT (1998) Soil water balance and plant water stress. Pages 41-54 in *Understanding Options for Agricultural Production* (G.Y. Tsugi, G. Hoogenboom, and P.K. Thornton, eds.). Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, The Netherlands.
- ROBOCK A, VINNIKOV KY, SRINIVASAN G, ENTIN JK, HOLLINGER SE, SPERANSKAYA NA, LIU S, NAMKHAI A (2000) The Global Soil Moisture Data Bank. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 1281–1299.

- ROSSI S, NIEMEYER S (2012) Drought Monitoring with estimates of the Fraction of Absorbed Photosynthetically-active Radiation (fAPAR) derived from MERIS. In: WARDLOW B, ANDERSON M, VERDIN J (HRSG.) Remote Sensing for Drought: Innovative Monitoring Approaches, CRC Press-Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA, 95–116.
- ROUAULT M, RICHARD Y (2003) Intensity and spatial extension of drought in South Africa at different time scales. *Water SA* 29(4), 489-500.
- ROUSE JW, HAAS RH, DEERING DW, SEHELL JA (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC 1978–4, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.
- ROUX PW (1993) Relative drought Resistance Indices for the Karoo Region. *Karoo Agric*, 5(2), 25-28.
- SAKAMOTO C, ACHUTUNI R, STEYAERT L (1984) Development of Agroclimatic/Crop Condition Index Assessment Models. Users Guide, NOAA, National Environmental Data and Information Service Assessment and Information Services Center und Atmospheric Science Department-University of Missouri
- SALAS J (1993) Analysis and modeling of hydrologic time series. *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York. Vol. 19, pp. 1–72.
- SÁNCHEZ S, SOLERA A, ANDREU J (2000) Gestión de sistemas de recursos hídricos basado en la evaluación del riesgo de sequía. – Proc. XIX congreso Latinoamericano de Hidráulica, pp. 655-664; zitiert von BENDER & SCHALLER (2014)
- SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens. Environ.*, 79(2-3): 213-224.
- SARKAR J (2011) Monitoring Drought Risks in India with Emphasis on Agricultural Drought. In: In: SIVAKUMAR MVK, RAYMOND PM, DONALD AW, WOOD DA (Eds.). 2011. *Agricultural Drought Indices*. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain: Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11,WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 197. (http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_agricultural_drought_indices_proceedings_2010.pdf; abgerufen am 17.10.2014)
- SASTRI ASRAS, RAMA KRISHNA YS, RAMANA RAO BV (1981) A new method for classification of agricultural droughts. - *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B*, 29, 293-297.
- SASTRI ASRAS (1993) Agricultural Drought Management Strategies to Alleviate Impacts: Examples from the Arid and Sub humid Regions of the Indian Subcontinent, in DA WILHITE (Hrsg.), *Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies*, Kluwer Academic Publishers , Dordrecht, 65-86.
- SCHALLER A (2013) Untersuchungen zu geänderten Starkniederschlägen aus gemessenen und modellierten Niederschlagszeitreihen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, 137 S.
- SCIEN B, DONNARI M (1997) Retrospective analysis of the palmer drought severity index in the semi-arid Pampas region, Argentina. *Int. J. Climatol.*, 17, 313–322.
- SELYANINOV GT (1937) Methods of climate description to agricultural purposes. In: *World Climate and Agriculture Handbook*, Leningrad – Moskow
- SEN Z (1976) Wet and dry periods of annual flows series, *Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 102(10), 1503–1514.
- SEN Z. (1977) Run-sums of annual flow series, *J. Hydrol.*, 35, 311–324.
- SEN Z. (1980) Statistical analysis of hydrologic critical droughts, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 106(1), 99–115.
- SENEY GB (2008) Modeling Landscape Evapotranspiration by Integrating Land Surface Phenology and a Water Balance Algorithm. *Algorithms*, 1, 52-68; DOI: 10.3390/a1020052
- SENEY GB (2009) Monitoring Daily Vegetation-Soil-Water Balance Components using the VegET Model (Updated: April, 2009; http://earlywarning.usgs.gov/usewem/readme/VegET_readme_USA.doc)

- SEPULCRE-CANTO G, HORION S, SINGLETON A, CARRAO H, VOGT J (2012). Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, Nr. 11 (29. November 2012): 3519–31. doi:10.5194/nhess-12-3519-2012.
- SHAFAER BA, DEZMAN LE (1982) Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In *Proceedings of the Western Snow Conference*, pp. 164–175. Colorado State University, Fort Collins, Colorado. (<http://www.westernsnowconference.org/sites/westernsnowconference.org/PDFs/1982Shafer.pdf>; zugegriffen am 17.10.2014)
- SHIAU J, SHEN HW (2001) Recurrence analysis of hydrologic drought of differing severity, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 127(1), 30–40.
- SHUKLA S, WOOD AW (2008) Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophys. Res. Lett.* 35, L02405. doi:10.1029/2007GL032487.
- SILVA DE RP, PUNYAWARDENA BVR, CHANDRALAL WDR (2006) Characterization of heavy rain and subsequent dry periods during the North-East monsoon in the dry zone of Sri Lanka. – *J. Natn. Sci. Foundation Sri Lanka* 2006 34(3): 159-161.
- SIMS AP, NIGOYI DDS, RAMAN S (2002) Adopting indices for estimating soil moisture: A North Carolina case study. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1183, doi:10.1029/2001GL013343.
- SIVAKUMAR MVK, WILHITE D, SVOBODA M, HAYES M, MOTHA R (2010) *Drought risk and meteorological droughts*. Hintergrundpaper zu: United Nations 2011 *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction – Revealing Risk, Redefining Development*. (http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/Sivakumar_et_al._2010.pdf; abgerufen am 07.10.2014)
- SIVAKUMAR MVK, STONE R, SENTELHAS PC, SVOBODA M, OMONDI P, SARKAR J, WARDLOW B (2011) Agricultural Drought Indices: Summary and Recommendations. In: SIVAKUMAR MVK, RAYMOND PM, DONALD AW, WOOD DA (Eds.). 2011. *Agricultural Drought Indices*. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain: Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11,WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 197 pp. (http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_agricultural_drought_indices_proceedings_2010.pdf; abgerufen am 17.10.2014)
- SMAKHTIN VU, HUGHES DA (2004) Review, automated estimation and analyses of drought indices in South Asia. Working Paper 83. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. (http://www.preventionweb.net/files/1869_VL102136.pdf; abgerufen am 01.10.2014)
- SMITH DMS, MCKEON GM (1998) Assessing the historical frequency of drought events on grazing properties in Australian rangelands. *Agricultural Systems* 57:271-299.
- SMITH K, RICHMAN MB (1993) Recent hydroclimatic fluctuations and their effects on water resources in Illinois. *Climatic Change*, 24, 249–269.
- SMITH DI, HUTCHINSON MF, MCARTHUR RJ (1992) *Climatic and Agricultural Drought: Payments and Policy*. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, Australia.
- SMITH DI, HUTCHINSON MF, MCARTHUR RJ (1993) Australian climatic and agricultural drought: Payments and policy. *Drought Network News* 5(3): 11-12.
- SNYDER RL (2002) Degree days. In: ROSSI F, DUCE P, SPANO D (eds) *Advanced short course on agricultural, forest and micro-meteorology*. CNR—Institute of Biometeorology, Florence, p 268–281
- SONMEZ F, KOMUSCU A, ERKAN A, TURGU E (2005) An Analysis of Spatial and Temporal Dimension of Drought Vulnerability in Turkey Using the Standardized Precipitation Index. *Natural Hazards*, 35, 243-264.
- STAHL K (2001) *Hydrological drought-a study across Europe*. Universitätsbibliothek Freiburg.
- STEFANSKI R (2011) Hydrological drought: Outcome of previous workshops. Proc. Expert Meeting on Hydrological Drought Indices, Geneva, Switzerland, WMO/UNISDR, 49 pp. (<http://www.wamis.org/agm/meetings/hdi11/S2-Stefanski.pdf>.]

- STEILA D (1987) Drought. Pages 388-395 in *The Encyclopedia of Climatology* (JE Oliver und RW Fairbridge, eds.). Van Nostrand Reinhold, New York.
- STEINEMANN A (2003) Drought indicators and triggers: A stochastic approach to evaluation. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, 39, 1217–1233. doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb03704.x.
- STEINEMANN AC, CAVALCANTI LFN (2006) Developing multiple indicators and triggers for drought plans. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132: 164-174
- STEINEMANN AC, HAYES MJ, CAVALCANTI L (2005). *Drought indicators and triggers. Drought and water crises: Science, technology, and management issues*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 71–92.
- STEPHENS DJ (1998) Objective criteria for estimating the severity of drought in the wheat cropping areas of Australia. *Agricultural Systems*, 57: 333-350.
- STEPHENSON N (1998) Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. *Journal of Biogeography* 25:855–870. doi: 10.1046/j.1365-2699.1998.00233.x.
- STROMMEN ND, MOTHA RP (1987). An operational early warning agricultural weather system. In: WILHITE DA, EASTERLING WE, WOOD DA (eds.) *Planning for drought: Toward a reduction of societal vulnerability*. Boulder, CO: Westview Press, pp. 153–164.
- STRZEPEK K, YATES D (1997) Climate change impacts on the hydrologic resources of Europe: a simplified continental scale analysis. *Climatic Change*, 36 (1): 79–92
- SVOBODA M (2000) An introduction to the Drought Monitor. *Drought Network News*, 12, 15–20. (<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1080&context=droughtnetnews>; abgerufen am 17.10.2014)
- SVOBODA M, LECOMTE D, HAYES M, HEIM R, GLEASON K, ANGEL J, RIPPEY B, TINKER R, PALECKI R, STOOKSBURY D, MISKUS D, STEPHENS S (2002). The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8):1181-1190. doi:10.1175/1520-0477(2002)083<1181:TDM>2.3.CO;2.
- SZALAI S, SZINELL CS, ZOBOKI J (2000) Drought monitoring in Hungary. *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management*, World Meteorological Organization, 182–199.
- TADESSE T, WARDLOW B (2007) The Vegetation Outlook (VegOut): A new tool for providing outlooks of general vegetation conditions using data mining techniques. In *Seventh IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW 2007)*, IEEE, pp. 667–672.
- TAHIRO E (2002) *Untersuchungen von Sommerweizengenotypen unterschiedlicher Herkunft auf Hitze- und Trockenstresstoleranz*. - Diss., Univ. Halle-Wittenberg.
- TAKEUCHI K (1974) Regional water exchange for drought alleviation. *Hydrology Paper 70*, Colorado state university (http://digitool.library.colostate.edu//exlibris/dtl/d3_1/apache_media/L2V4bGlicmlzL2R0bC9kM18xL2FwYWNoZV9tZWVpYS8xNTQ3MTU=.pdf; abgerufen am 01.10.2014)
- TALLAKSEN LM & HISDAL H (1997) Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume. – In: Gustard et al. [eds.]: *FRIEND'97-Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management* 141-150. IAHS Publ. no. 246. (http://ks360352.kimsufi.com/redbooks/a246/iahs_246_0141.pdf, abgerufen am 02.10.2014)
- TALLAKSEN L, VAN LANEN H (Hrsg.; 2004) *Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. *Developments in Water Science*, 48, Elsevier, Amsterdam: 579 pp.
- TALLAKSEN LM, MADSEN H, CLAUSEN B (1997) On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences J.*, 42(1), 15-33.
- TANG C, PIECHOTA TC (2009) Spatial and temporal soil moisture and drought variability in the upper Colorado River basin. *J. Hydrol.*, 379, 122–135.
- TATE EL & GUSTARD A (2000) Drought definition: a hydrological perspective. – In: Vogt JV & Somma F [eds.]: *Drought and Drought Mitigation in Europe*, 23-48.

- TEBALDI C, HAYHOE K, ARBLASTER JM, MEEHL GA (2006) Going to the extremes. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Climatic Change*, 79(3-4), 185-211.
- THENKABAIL PS, GAMAGE MSDN, SMAKHTIN VU (2004) The Use of Remote Sensing Data for Drought Assessment and Monitoring in Southwest Asia. Research Report 85. Colombo, Sri Lanka, International Water Management Institute
- THORNTHWAITE CW (1931) The climate of North America according to a new classification. *Geogr. Rev.*, 21, 633–655.
- THORNTHWAITE CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94. (<http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf>; abgerufen am 17.10.2014)
- THORNTHWAITE CW (1947) Climate and moisture conservation: *Assoc. Am. Geographers Annals* 37: 87-100.
- THORNTHWAITE CW, MATHER JR (1955) The water balance. *Publications in Climatology VIII(1):1-104*, Drexel Institute of Climatology, Centerton, New Jersey.
- TIGKAS D (2008) Drought characterisation and monitoring in regions of Greece. *European Water*, 23/24, pp. 29–39
- TIGKAS D, VANGELIS H, TSAKIRIS G (2014) DrinC: A Software for Drought Analysis Based on Drought Indices. *Earth Science Informatics*, 25. September 2014. doi:10.1007/s12145-014-0178-y.
- TITLOW, J.K., 1987. A precipitation-based drought index for the Delaware river basin. *Publications in Climatology* 40. C.W. Thornthwaite Associates, Centerton, NJ.
- TODOROVIC P, WOOLHISER DA (1976) Stochastic structure of the local pattern of precipitation. In: SHEN HW (Hrsg.), *Stochastic Approaches to Water Resources*, Vol. 2. Colorado State University, Fort Collins, CO.
- TSAKIRIS G, VANGELIS H (2005) Establishing a Drought Index incorporating evapotranspiration, *European Water*; 9-10: 3-11.
- TSAKIRIS G, PANGALOU D, VANGELIS H (2006) Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI), *Water Resources Management*, 21(5), 821-833, DOI: 10.1007/s11269-006-9105-4.
- TSAKIRIS G, PANGALOU D, TIGKAS D, VANGELIS H (2007) Assessing the Areal Extent of Drought, EWRA International Symposium on Water Resource Management: New Approaches and Technologies, Chania, Crete - Greece, 14-16 June 2007 (http://www.ntua.gr/hazard/publications/EWRA2007_Chania.pdf; abgerufen am 17.10.2014)
- TSAKIRIS G, NALBANTIS I, PANGALOU D, TIGKAS D, VANGELIS H (2008) Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI). In: LOPEZ AF (Hrsg.), *Proceedings of the 1st International Conference "Drought Management: scientific and Technological Innovations"*, Option Méditerranéennes, Series A, No. 80, Zaragoza, Spain, 12–14 June 2008, pp. 57–62 (http://www.iamz.ciheam.org/medroplan/a-80_OPTIONS/Sesion%201/%28057-62%2906%20Tsakiris%20%20OS1.pdf; abgerufen am 17.10.2014)
- TUCKER CJ (1979) Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. – *Remote Sensing of Environment*, 8(2):127-150.
- UNEP (1992) *World Atlas of Desertification*. Edward Arnold, London.
- UN SECRETARIAT GENERAL (1994) *United Nations Convention to Combat Drought and Desertification in Countries Experiencing Serious Droughts and/or Desertification, Particularly in Africa*. Paris.
- VAN DER SCHRIER G, EFTHYMIADIS D, BRIFFA KR, JONES PD (2007) European Alpine moisture variability for 1800–2003. - *Int J. Climatol.*, 27:415–427
- VAN-ROOY MP (1965) A Rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space. *Notos* 14: 43–48.
- VANGELIS H, TIGKAS D, TSAKIRIS G (2013) The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *Journal of Arid Environments*, 88: 130-140. doi: 10.1016/j.jaridenv.2012.07.020
- VASILIADES L, LOUKAS A, LIBERIS N (2011) A water balance derived drought index for Pinios River Basin, Greece. *Water Resources Management*, 25(4): 1087–1101.

- VERGNI L, TODISCO F (2010) Valutazione di un indice standardizzato per lo studio della frequenza e della durata del deficit idrico. Atti del XXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Palermo, 14–17 Settembre 2010 (2010) ISBN:978-88-903895.
- VERGNI L, TODISCO F (2011) Spatio-temporal variability of precipitation, temperature and agricultural drought indices in Central Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(3): 301–313.
- VICENTE-SERRANO SM (2006) Differences in spatial patterns of drought on different time scales: An analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resour. Manage.*, 20, 37–60.
- VICENTE-SERRANO SM (2007) Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region. *Nat. Hazards*, 40, 173–208.
- VICENTE-SERRANO SM, LÓPEZ-MORENO JI (2005) Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 523–533.
- VICENTE-SERRANO SM, CUADRAT JM, ROMO A (2006) Early prediction of crop productions using drought indices at different time scales and remote sensing data: Application in the Ebro valley (north-east Spain). *Int. J. Remote Sens.*, 27, 511–518.
- VICENTE-SERRANO SM, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO JI (2010a) A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate*, 23, 1696–1718.
- VICENTE-SERRANO SM, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO JI, ANGULO M, EL KENAWY A (2010b) A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscale drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index. *J. Hydrometeorol.*, 11, 1033–1043.
- VICENTE-SERRANO SM, LASANTA T, GRACIA C (2010c) Aridification determines changes in leaf activity in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 150, 614–628.
- VICENTE-SERRANO SM, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO JI (2011) Comment on “Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900–2008” by Dai A, *J. Geophys. Res.*, 116, D19112, doi:10.1029/2011JD016410.
- VICENTE-SERRANO SM, BEGUERÍA S, LORENZO-LACRUZ J, CAMARERO JJ, LÓPEZ-MORENO JI, AZORIN-MOLINA C, REVUELTO J, MORÁN-TEJEDA E, SANCHEZ-LORENZO A (2012a) Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interact.* 16:1–27.
- VICENTE-SERRANO SM, LÓPEZ-MORENO JI, BEGUERÍA S, LORENZO-LACRUZ J, AZORIN-MOLINA C, MORÁN-TEJEDA E (2012b) Accurate computation of a streamflow drought index. *J. Hydrol. Eng.*, 17, 318–332, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433.
- WAGGONER ML, O’CONNELL TJ (1956) Antecedent precipitation index. *Weekly Weather and Crop Bulletin*, Vol. XLIII, 6–7. Zitiert in Heim (2002)
- WAN Z, Wang P, LI X (2004) Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *Int. J. Remote Sens.*, 25(1): 61–72.
- WANG L, QU JJ (2007) NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophys. Res. Lett.* 34(20), L20405.
- WARREN A, KHOGALI M (1992) Assessment of Desertification and Drought in the Sudan–Sahelian Region 1985–1991. UNSO, New York.
- WEBB RS, ROSENZWEIG CE, LEVINE ER (1993) Specifying land surface characteristics in general circulation models: Soil profile data set and derived water-holding capacities. *Global Biogeochem. Cycles*, 7, 97–108.
- WEBER L, NKEMDIRIM LC (1998) Palmer’s Drought Indices Revisited. *Geogr. Ann.*, 80A, 153–172.
- WEGHORST KM (1996) The reclamation drought index: Guidelines and practical applications. Bureau of Reclamation, Denver, CO, 6 pp [Available from Bureau of Reclamation, D-8530, Box 25007, Lakewood, CO 80226.].

- WELLS N, GODDARD S, HAYES MJ (2004) A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate* 17:2335-2351.
- WENDLING U, MÜLLER J, SCHWEDE K (1984) Ergebnisse von Verdunstungsmessungen über Gras mit einem offline-Datenerfassungssystem. *Zeitschrift für Meteorologie*, 34:190–202
- WHITE RCL (1955) Drought and effective rainfall frequency in pastoral New South Wales west of the wheat belt. *Meteorological Study No. 5*, Bureau of Meteorology, Australia.
- WHITE DH (2000) Implementing drought policy in Australia. *Agricultural Science* 13: 27-32.
- WHITE DH, O'MEAGHER B (1995) Coping with exceptional droughts in Australia. *Drought Network News* 7(2):13–17.
- WHITE DH, WALCOTT JJ (2009) The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: A review. *Crop and Pasture Science* 60:599-616.
- WHITE DH, HOWDEN SM, WALCOTT JJ, CANNON RM (1998) A framework for estimating the extent and severity of drought, based on a grazing system in south-eastern Australia. *Agricultural Systems* 57:259-270.
- WILHITE DA (1995) Developing a precipitation-based index to assess climatic conditions across Nebraska. Final report submitted to the Natural Resources Commission, Lincoln, Nebraska. (Zitiert von HAYES 2002)
- WILHITE DA (2000) Drought: a global assessment. Volume I. - *Routledge Hazards and Disasters Series*. Routledge, London.
- WILHITE DA (2004) Drought as a natural hazard. In *International Perspectives on Natural Disasters: Occurrence, Mitigation, and Consequences*. Hrsg: JP STOLTMAN, J LIDSTONE, LM DECHANO. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. pp. 147–162.
- WILHITE DA & GLANTZ MH (1985) Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. – *Water International* 10(3): 111–120.
- WILHITE DA, SVOBODA MD, HAYES MJ (2006) Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management*, 21: 763-774.
- WILLEKE G, HOSKING JRM, WALLIS JR, GUTTMAN NB (1994) *The National Drought Atlas*. Institute for Water Resources Report 94-NDS-4, U.S. Army Corps of Engineers.
- WILLIAMS JR, JONES CA, DYKE PT (1984) A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27 (1), 129–144. (Zitiert in NARASIMHAN & SRINIVASAN 2005)
- WMO (1966) Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. WMO No. 201, Technical Note 83.
- WMO: World Meteorological Organization (1974) *International Glossary of Hydrology*. WMO-No. 385, World Meteorological Organization Geneva, Switzerland.
- WMO: World Meteorological Organization (1975) *Drought and Agriculture: Report of the CAgM Working Group on the Assessment of Drought*. erstellt durch CE HOUNAM (Vorsitz), JJ BURGOS, MS KALIK, WC PALMER und J RODDA. Technical Note No. 138, WMO No. 392, World Meteorological Organization, Geneva.
- WMO: World Meteorological Organization (1986) *Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974–1985*, WMO, Geneva, p. 118. (zitiert in MISHRA & SINGH 2010)
- WMO: World Meteorological Organization (1992) *Monitoring, Assessment and Combat of Drought and Desertification*. Report. Erstellt von: CAgM-IX Working Group on Monitoring, Assessment and Combat of Drought and Desertification. CAgM Report No. 47. WMO TD No. 505, World Meteorological Organization, Geneva.
- WMO: World Meteorological Organization (2010) *Summary and Recommendations of the Meeting. WMO/UNISDR Expert Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain*. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland (http://www.chsegura.es/export/descargas/cuenca/sequias/escasez/docsdescarga/WMO_Summary_and_Recommendations_of_the_Meeting.pdf&rct=j&sa=U&ei=xmP_TJXQOoiUOoWRzLIM&ved=0CBQQFjAA&q=WMO+agricultural+drought+risk+recommendation+murcia&usq=AFQjCNHYSeMaovK2ruHOW; abgerufen am 07.10.2014).

- WMO: World Meteorological Organization (2012) International Glossary of Hydrology. WMO-No. 385, World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. (http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf; zugegriffen am 17.10.2014)
- WU H, SVOBODA MD, HAYES MJ, WILHITE DA, WEN F (2007) Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *Int. J. Climatol.* 27, 65–79.
- YANG Z, LIU Q (2011) Response of streamflow to climate changes in the Yellow River basin, China. *J. Hydro-meteor.*, 12, 1113–1126.
- YEVJEVICH V (1967) An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology Paper 23, Colorado State University, Fort Collins, CO, 18 pp. (http://digitool.library.colostate.edu///exlibris/dtl/d3_1/apache_media/L2V4bGlicmlzL2R0bC9kM18xL2FwYWNoZV9tZWRpYS8xNTIzMTk=.pdf; zugegriffen am 17.10.2014)
- YOO C, KIM S, KIM T (2006) Assessment of drought vulnerability based on the soil moisture PDF. *Stochastic Environmental Resource Risk Assessment*, 21: 131-141.
- YULIANTI JS, BURN DH (1998) Investigating links between climatic warming and low streamflow in the prairies region of Canada. *Can. Water Resour. J.*, 23, 45–60.
- ZARCH MA, MALEKINEZHAD H, MOBIN MH, DASTORANI MT, KOUSARI MR (2011) Drought monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*, 25 (13), 3485–3504
- ZARGAR A, SADIQ R, NASER B, KHAN FI (2011) A Review of Drought Indices. *Environmental Reviews* 19 (1): 333–49. doi:10.1139/a11-013.
- ZELENHASIC E, SALVAI A (1987) A Method of Streamflow Drought Analysis. – *Wat. Resour. Res.*, 23 (1), 156-168.
- ZHAI J, SU B, KRYSANOVA V, VETTER T, GAO C, JIANG T (2010) Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in 10 large regions of China. *J. Climate*, 23, 649–663.
- ZIESE M (2014) Ein global anwendbarer Dürreindex des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie (WZN) Newsletter Hydrometeorologie Nr.11 – April 2014. Deutscher Wetterdienst, Offenbach. (<http://alephino.dwd.de:8060/repository/DOC000002/BI00137939.pdf>; abgerufen am 08.10.2014).
- ZIESE M, SCHNEIDER U, MEYER-CHRISTOFFER A, SCHAMM K, VIDO J, FINGER P, BISSOLLI P, PIETZSCH S, BECKER A (2014) The GPCC Drought Index – a new, combined and gridded global drought index. *Earth Syst. Sci. Data*, 6, 285-295.
- ZINONI F, MARLETTO V (2003) Prime valutazioni di un nuovo indice di siccità agricola. *Atti convegno Aiam* 2003, 24–25 maggio 2003, Bologna, pp. 232–238.

10 Anhang

Anlage 1:	Beschreibung ausgewählter meteorologischer Dürreindizes	136
Anlage 2:	Beschreibung ausgewählter landwirtschaftlicher Dürreindizes	159
Anlage 3:	Hydrologische Dürreindizes	168
Anlage 4:	Kombinierte Dürreindizes.....	171
Anlage 5:	Wesentliche Inhalte und Ergebnisse bekannter Dürrereviews und Vergleichsstudien.....	178
Anlage 6:	Übersicht über einige nationale, regionale und kontinentale Dürremonitoringzentren	188
Anlage 7:	Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes für die auf Jahresbasis akkumulierten Werte (oberste Teilabb.) sowie die Zeitskalen 1 und 3 Monate	194
Anlage 8:	Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes für die Zeitskalen 12 und 24 Monate	199
Anlage 9:	Zeitlicher Verlauf der a) Jahreswerte (außer HTC) von metTP, WSDI, SPI-1, SPEI-1 und HTC und b) der SPI-1, SPEI-1 und HTC-Werte für den Zeitraum Mai bis Sept.; Station Görlitz	203
Anlage 10:	Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte (aus Monats- bzw. Tageswerten gemittelte Werte) von SPI-1 und SPEI-1 sowie der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierte Bodenfeuchte (BF in % der nutzbaren Feldkapazität nFk) an vier Standorten im Zeitraum 1961–2013	204
Anlage 11:	Vergleich des Jahresgangs der mittels METVER (Winterweizen) modellierten Bodenfeuchte (in %nFk) an fünf Standorten mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) sowie Niederschlagstagen ($\geq 5/10/20$ mm = P5/10/20mm) drei ausgewählte Trockenjahre (1972)	205

Anlage 1: Beschreibung ausgewählter meteorologischer Dürreindizes

Anlage 1-1: 'Warmphasendauer-Index' (<i>Warm Spell Duration Index</i> , WSDI).....	137
Anlage 1-2: Meteorologische Trockenperioden	137
Anlage 1-3: ‚Vorläufer-Niederschlagsindex‘ (<i>Antecedent Precipitation Index</i> , API).....	138
Anlage 1-4: ‚Effektiver Dürreindex‘ (<i>Effective Drought Index</i> , EDI).....	138
Anlage 1-5: ‚Prozent-vom-Normalen‘ (<i>Percent of Normal</i> , PN)	140
Anlage 1-6: Kumulative Niederschlagsanomalien (<i>Cumulative Precipitation Deficit</i> , CPD).....	141
Anlage 1-7: ‚Niederschlagsanomalienindex‘ (<i>Rainfall Anomaly Index</i> , RAI).....	142
Anlage 1-8: Dezile (DI)	143
Anlage 1-9: Dürreindex nach Bhalme-Mooley (<i>Bhalme-Mooley Drought Index</i> , BMDI)	145
Anlage 1-10: Standardisierter Anomalien-Index (<i>Standardized Anomaly Index</i> , SAI)	146
Anlage 1-11: NOAA-Dürreindex (<i>NOAA Drought Index</i> NDI)	147
Anlage 1-12: Hutchinson-Dürreschwereindex (<i>Hutchinson Drought [Severity] Index</i> , HDSI)	147
Anlage 1-13: Standardisierter Niederschlagsindex (<i>Standardized Precipitation Index</i> , SPI)	147
Anlage 1-14: Nationaler Niederschlagsindex (<i>National Rainfall Index</i> , RI).....	148
Anlage 1-15: Dürreschwereindex (<i>Drought Severity Index</i> , DSI).....	149
Anlage 1-16: Trockenheitsindex nach de Martonne (auch Ariditätsindex, dMI)	149
Anlage 1-17: Hydro-thermaler Seljaninow-Koeffizient (HTC)	150
Anlage 1-18: ‚Reconnaissance-Dürreindex‘ (<i>Reconnaissance Drought Index</i> , RDI).....	150
Anlage 1-19: ‚Akkumulierter Dürreindex‘ (<i>Accumulated Drought Index</i> ADI).....	152
Anlage 1-20: Standardisierter Niederschlags-Evapotranspirations-Index (<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i> , SPEI)	152
Anlage 1-21: Global anwendbarer Dürreindex (GPCC-DI).....	153
Anlage 1-22: Palmer Dürrestärkeindex (<i>Palmer Drought [Severity] Index</i> ; Palmer; PDSI/ PDI)	154
Anlage 1-23: Selbstkalibrierender PDSI (<i>Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index</i> sc-PDSI)	156
Anlage 1-24: Wasserbilanzindex mit zwei Speichern (<i>Water Balance Index with Two Reservoirs</i>)	157

Anlage 1-1: 'Warmphasendauer-Index' (*Warm Spell Duration Index, WSDI*)

Das gemeinsame Expertenteam zur Detektion, Monitoring und Indizes des Klimawandels (ETCCDMI) des Projektes CLIVAR zur Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit der WMO-Kommission für Klimatologie (CCI) und des Weltklimaforschungsprogrammes (WCRP) hat Anstrengungen unternommen, den hier vorgestellten Warmphasen- (*warm spell*) Index als einen der Kernindizes zur Beschreibung extremer Klimaverhältnisse und deren Wandels zu etablieren. Die Analyse von Kälte- und Hitzewellen-Indizes erlaubt dabei das unkomplizierte Monitoring von Trends in der Häufigkeit von Ereignissen, die nicht unbedingt extrem, aber doch zumindest stressvoll sind (SIVAKUMAR et al. 2011). Dabei werden zumeist das 10. und das 90. Perzentil zu Grunde gelegt. Die Bestimmung erfolgt also standortspezifisch, relativ zum lokalen Klima, was den räumlichen Vergleich erleichtert.

Der Warmphasen-Dauer-Indikator (*Warm spell duration indicator WSDI*) ist definiert als die jährliche Zahl an Tagen, wo an mit mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen die Maximaltemperaturen oberhalb des 90. Perzentils (i. A. für die Klimanormalperiode 1961–1990) liegen (SIVAKUMAR et al. 2011). Die Perzentilschwellenwerte werden dabei über ein fünftägiges Fenster, dessen Mitte auf dem betrachteten Kalendertag liegt, berechnet.

Anlage 1-2: Meteorologische Trockenperioden

Hinsichtlich von Trockenperioden werden unter anderem folgende Definitionen vorgeschlagen, die teilweise auch andere Klimaparameter abgesehen von Niederschlag einbeziehen:

- 1) Deutschland: Eine Trockenperiode ist eine Aufeinanderfolge von mindestens elf Tagen, wobei die Niederschlagshöhe an allen Tagen ≤ 1.0 mm sein muss (DIETZER 2001, BERNHOFER et al. 2005, KLIWA 2006).
- 2) Deutschland: Bezogen auf Monatsdaten wird der Schwellenwert für eine Trockenperiode auf ≤ 40 mm/mon festgelegt (BECKER & SCHRÖTER 2001). Dabei erfolgt keine Angabe zur Mindestlänge.
- 3) Deutschland: KREIENKAMP (2011) beschrieb das 30-Tage- und das 60-Tage-Kriterium für die Definition von Trockenheit, wobei diese Kriterien auch speziell auf die thermische Vegetationsperiode angewendet werden können. Eine Trockenheit liegt demnach vor, wenn der akkumulierte Niederschlag über 30/60 Tage höchstens 10/20 mm beträgt.
- 4) Österreich: Eine Trockenperiode ist ein Zeitabschnitt von mindestens sechs Tagen Länge mit Tagesniederschlagshöhen von $\leq 0,2$ mm/d (NOBILIS 1980).
- 5) Österreich: Ein trockener Zeitraum beginnt, wenn am Vortag und am Tag des Beginns zusammen nicht mehr als 0,5 mm Niederschlag fallen und dieser Niederschlag die potenzielle Verdunstung am Tag des Beginns nicht übertrifft. Der trockene Zeitraum hält an, wenn die täglichen Niederschlagssummen höchstens 0,5 mm betragen oder die Niederschlagssumme zweier aufeinanderfolgender Tage größer gleich 3,0 mm und kleiner als die potenzielle Verdunstung dieser Tage ist. Ein derart ermittelter trockener Zeitraum wird nur dann als Trockenperiode gewertet, wenn der eine Mindestdauer von 5 Tagen aufweist und in ihm die Differenz aus potenzieller Verdunstung und Niederschlag mindestens 10 mm beträgt. (MÜHLETHALER 2004)
- 6) Schweiz: Aufeinanderfolge von mindestens vier Tagen, an denen das Maximum der Lufttemperatur über dem Regelwert des langjährigen mittleren Maximums und die relative Luftfeuchtigkeit gleichzeitig zum Mittagstermin (14 h) nicht über 40 % liegen (OcCC 2000).
- 7) Schweiz: 10 Tage mit Niederschlägen $\leq 0,5$ mm/d (GYALISTRAS 2000)
- 8) Britannien: 15 aufeinanderfolgende Tage mit Niederschlägen $< 0,25$ mm [oder $< 1,0$ mm] (British Rainfall Organization 1936 in WMO 1975);
- 9) Neuseeland: 15 aufeinanderfolgende Tage mit Niederschlägen $< 0,1$ mm (Dürreperiode, *drought period*) bzw. ≤ 1.0 mm (Trockenphasen, *dry spells*; MOSLEY & PEARSON 1997)
- 10) Russland: 10 Tage mit Niederschlägen $\leq 5,0$ mm/d (HEIM 2002)

- 11) Bali: sechs Tage ohne Niederschlag (= 0 mm/d; HUDSON & HAZEN 1964 in WILHITE & GLANTZ 1985)
- 12) Sri Lanka: 10 Tage mit Tagesniederschlägen $\leq 1,0$ mm/d (DE SILVA et al. 2006)
- 13) Humide Gebiete: 15 bzw. 30 Tage Tagesniederschlägen $\leq 0,25$ mm/d (HEIM 2002, MANIAK 2005)
- 14) USA: Eine Trockenperiode ist die Aufeinanderfolge von Tagen mit Niederschlägen $\leq 1,27$ mm/d (MUNGER 1916; Abschnitt 3.4.1) bzw. $\leq 2,54$ mm innerhalb von 48 h (BLUMENSTOCK 1942; Abschnitt 3.4.1)
- 15) Universell: Aufeinanderfolgende Tage mit $\leq 1,0$ mm/d ohne Vorgabe einer Mindestlänge⁵
- 16) Universell: Trockentage-Index (*consecutive dry days*, CDD): Dieser Index bezieht sich auf die längste Periode von aufeinanderfolgenden Trockentagen innerhalb eines Jahres, wobei in den meisten Publikationen der Schwellenwert für die Definition eines Trockentages bei 1 mm liegt (z.B. KARL et al. 1999, PETERSON et al. 2001, FRICH et al. 2002, ALEXANDER et al. 2006, TEBALDI et al. 2006) Das UK Met Office (in BECK et al. 2004) hat auch 2 mm Niederschlagshöhe verwendet.

Der Deutsche Wetterdienst beschreibt in seinem Onlinelexikon⁶ sehr gut die Schwierigkeiten bei der Definition einer Trockenperiode:

„Es existieren keine einheitlichen Festlegungen, ab wieviel Tagen ohne (oder mit nur sehr geringen) Niederschlägen von einer ‚Trockenperiode‘ die Rede sein kann. Sie hängt vom Wasserbedarf der einzelnen Bereiche ab und kann demzufolge in der warmen Jahreszeit schon nach einigen trockenen Tagen beginnen. Im Winter sorgt die wegen der niedrigen Luft- und Bodentemperaturen gegenüber dem Sommer stark verminderte Verdunstung dafür, dass trotz minimaler Niederschläge eines Monats eine echte „Trockenperiode“ nur schwer erreicht werden kann. Der Grundwasserstand und die Wasserstände der Flüsse sind dabei ebenfalls zu beachten. Liegen die Ausgangswerte vor einer Periode mit keinen oder nur geringen Niederschlägen recht hoch, dauert es entsprechend länger, bis es zu einer ‚Trockenperiode‘ kommt.“

Anlage 1-3: ‚Vorläufer-Niederschlagsindex‘ (Antecedent Precipitation Index, API)

MCQUIGG (1954) und WAGGONER & O’CONNELL (1956) bezogen die Menge und das Timing des Niederschlags in ihren Vorläufer-Niederschlagsindex API (*Antecedent Precipitation Index*) ein. Sie entwickelten den Index, um die Bodenfeuchte zu schätzen und zur Verwendung in der Überschwemmungsvorhersage. Der API wird auf Tagesbasis berechnet, indem der Indexwert des Vortages mit einem Faktor – gewöhnlich 0,9 – multipliziert wird. Treten Niederschläge auf, so wird die Niederschlagssumme zum Indexwert addiert. Schnee wird an dem Tag einbezogen, an dem er schmilzt. Für den Osten und die zentralen Gebiete der USA liefert der Index gute Ergebnisse. So waren beispielsweise die Maiserträge in Iowa schlecht, wenn der API unter 0,1 fiel und ebenso in den nassen Jahren, wo der Index von Mitte Mai bis Mitte August nicht unterhalb von 0,5 fiel.

Anlage 1-4: ‚Effektiver Dürreindex‘ (Effective Drought Index, EDI)

Effektiver Niederschlag EP ist definiert als der Niederschlag, der notwendig ist, der Evapotranspiration entgegen zu wirken und die Bodenfeuchte über dem Welkepunkt zu halten. Eine niederschlagsfreie Periode dauert definitionsgemäß so lange, wie der Niederschlag unterhalb des effektiven Niederschlags liegt und seine Schwere wird durch die Gesamtmenge des Niederschlags während dieses Zeitraumes oder als Differenz zwischen dem effektiven und beobachteten Niederschlag bestimmt (HISDAL & TALLASKEN 2000). Im Gegensatz zu vielen anderen Dürreindikatoren wird der EDI in seiner ursprünglichen Form (BYUN & WILHITE 1999) mit einem täglichen Tagesschritt berechnet. Er ist eine Funktion des Niederschlags, der für die Rückkehr zu normalen Bedingungen (PRN), also der Erholung von einem akkumulierten Defizit seit dem Beginn der Dürre, notwendig ist. Für die Dauer k wird der EDI folgendermaßen berechnet:

$$EDI_k = PRN_k / s(PRN_k).$$

⁵ <http://eca.knmi.nl>

⁶ <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=T&DAT=Trockenperiode> , abgerufen am 1.10.2014

Dabei ist $s(PRN_k)$ die Standardabweichung der täglichen PRN. Der für die Rückkehr zu Normalbedingungen notwendige Niederschlag (PRN) wird aus dem effektiven Niederschlag EP und dem Mittelwert der täglichen EP (z.B. über die Klimanormalperiode) berechnet:

$$PRN_k = \frac{EP_k - MEP}{\sum_{N=1}^k (1/N)}$$

Der effektive Niederschlag wiederum bezieht sich auf die Summation aller täglichen Niederschlagsdaten mit einer Zeitreduktionsfunktion. Der EP jedes Tages ist also die Funktion des Niederschlags des gegenwärtigen Tages und der vorangegangenen Tage, jedoch nicht geringerem Gewicht:

$$EP_i = \sum_{m=1}^i \frac{P_m}{n}$$

Wobei i die Dauer der Summation und P_m der der Niederschlag von m Tagen vor dem Zeitpunkt i ist.

Die Berechnung des EDI beginnt mit der Anwendung eines Platzhalters für die Wasserdefizitperiode als Voraussetzung der Bestimmung der echten Periode. Als Platzhalter können beispielsweise 365 Tage oder ein repräsentativer Wert für die insgesamt für einen längeren Zeitraum verfügbaren oder gespeicherten Wasserressourcen oder auch als Repräsentant einer kurzen Periode nur 15 Tage Dauer gewählt werden (MORID et al. 2006). Mehr Details zur recht komplexen Berechnungsprozedur des EDI sind in BYUN & WILHITE (1999) nachzulesen.

Ähnlich dem SPI sind EDI-Werte standardisiert, was den Vergleich der Dürreintensität verschiedener Orte erlaubt, unabhängig von den klimatischen Unterschieden zwischen ihnen. Die EDI-Werte variieren zwischen -2 und +2. Die Zuordnung von Feuchtezuständen zu EDI-Wert-Bereichen ist in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Klassifizierung der EDI-Werte

EDI-Wert	Feuchtezustand
EDI > 2	extrem nass
1,99 > EDI > 1,50	sehr nass
1,49 > EDI > 1,00	mäßig nass
0,99 > EDI > -0,99	nahe normal
-1,00 > EDI > -1,49	mäßig Dürre
-1,50 > EDI > -1,99	schwere Dürre
EDI < -2	extreme Dürre

Der EDI kann auch in monatlichen Zeitschritten berechnet werden (Modifikation von SMAKHTIN & HUGHES 2004). Dann sollte jedoch ein Leistungsvergleich zu anderen Dürreindikatoren erfolgen.

MORID et al. (2006) fanden, dass der EDI bei ihren im Iran durchgeführten Studien aufkommende Dürrebedingungen im Vergleich zum Dezil-Index von GIBBS & MAHER (1967) und dem SPI besonders gut identifizierte. BYUN & KIM (2010) fanden beim Vergleich des EDI mit dem für sechs Zeitskalen berechneten SPI (1-, 3-, 6-, 9-, 12-, 24-Monate) für die Klimazeitreihe von Seoul, Korea, deutliche Korrelationen zwischen beiden Indikatoren, v. a. für die langen Zeitskalen des SPI von 12 und 24 Monaten. Die Autoren beschreiben, dass der EDI Dürren sowohl auf den kurzen als auch auf den langen Zeitskalen gut identifizieren kann, was die Verwendung von sechs unterschiedlichen SPI-Berechnungen für den gleichen Zeitraum überflüssig macht. Zudem hat

der EDI gegenüber dem SPI Vorteile, wenn es um das Dürremonitoring in Echtzeit geht, da Tagesschritte verwendet werden. In Korea wird der EDI für das Echtzeit-Dürremonitoring verwendet.

Anlage 1-5: ‚Prozent-vom-Normalen‘ (*Percent of Normal, PN*)

Der Prozent-vom-Normalen-Indikator wird berechnet, indem der aktuelle Niederschlag durch den ‚normalen‘ Niederschlag (i.A. 30-jähriger Mittelwert) geteilt und mit 100 % multipliziert wird. Dies kann für eine ganze Reihe von Zeitskalen (Monatswerte, Jahreszeiten, Jahreswerte) durchgeführt werden. Nach HAYES (2000) sind Analysen des Prozent-vom-Normalen am effektivsten, wenn sie nur für eine einzelne Region oder eine einzelne Jahreszeit vorgenommen werden. In Abhängigkeit vom Ort und der Jahreszeit kann der Prozent-vom-Normalen Index missverstanden werden und die Verhältnisse unterschiedlich anzeigen. Aufgrund von unterschiedlichen Ansichten zum Normalwert in verschiedenen Regionen ist er weniger gut zum Standortvergleich geeignet.

Der Wert dieses Ansatzes liegt in seiner Einfachheit und Transparenz, insbesondere weil die meisten Sektoren dazu tendieren, „zu wissen was er bedeutet“ (SIVAKUMAR et al. 2011). Die Kehrseite dieses Ansatzes ist, dass er nicht notwendiger Weise Extreme in den Dürrebedingungen entdeckt, was in sehr ariden Gebieten problematisch werden kann. Um die Methode nutzbringend anzuwenden, ist auch eine ganze Menge an Wissen über die lokalen Verhältnisse notwendig. Zudem entspricht der mittlere Niederschlag in vielen Regionen der Welt (v. a. jenen mit großer Jahr-zu-Jahr-Variabilität des Niederschlags) aufgrund der fehlenden Normalverteilung des Niederschlags häufig nicht dem Medianwert (HAYES 2000). Die Nutzung dieses Indikators impliziert jedoch Normalverteilung, weshalb er am besten in Regionen eingesetzt wird, in denen man davon ausgehen kann, dass Mittelwert und Median gleich sind.

Basierend auf diesem Indikator sind verschiedenste Dürredefinitionen möglich:

- USA: jährlicher Niederschlag < 75 % des Normalwertes oder monatlicher Niederschlag < 65 % des Normalwertes (BATES 1935)
- USA: < 85 % des Normalen für jeden Zeitschritt (HOYT 1936)
- Indien: Saisonales Niederschlagsdefizit von mehr als 50 % für schwerwiegende Dürrebedingungen im Staat Andhra Pradesh (BANERJI & CHABRA 1964)
- Indien: Dürrebeginn, wenn aktueller Wochenniederschlag ≤ die Hälfte des Normalen (RAMDAS 1950)
- Indien: Jahresniederschlag < 75 % des Mittelwertes (CLARKE 1991)
- Südafrika: Perioden mit < 70 % des Normalniederschlags (BRUWER 1990)
- Deutschland (DWD): Abweichung des Monats- bzw. Jahresmittels vom vieljährigen Mittel 1961-1990 entsprechend der Einteilung in Tabelle 21.

Tabelle 21: Klassifizierung von Trockenheitszuständen unter Nutzung des Prozent-vom-Normalen Ansatzes für Monats- und Jahreswerte

Niederschlag	Zu trocken	Deutlich zu trocken	Markant zu trocken
Monatssumme	99 bis 50 %	49 bis 25 %	unter 25 %
Jahressumme	99 bis 75 %	74 bis 50 %	unter 50 %

Anlage 1-6: Kumulative Niederschlagsanomalien (*Cumulative Precipitation Deficit, CPD*)

In einer Erweiterung des Ansatzes der Nutzung von Niederschlagsanomalien wie den Dezilen oder dem Prozent-vom-Normalen-Indikator, kann die Dauer und Schwere von Dürre auch durch das Aufsummieren von Niederschlagsanomalien für jeden Monat geschätzt werden (SIVAKUMAR et al. 2011):

$$CPD_n = \sum (\bar{P} - P_n) \text{ für } P_n < \bar{P}$$

Die Akkumulation des Niederschlagsdefizites bzw. -überschusses wird dann grafisch aufgetragen. Diese Methode gibt also weniger den zu einem festen Zeitpunkt gemessenen meteorologischen Niederschlag an, sondern kennzeichnet vielmehr den Einfluss des vorangegangenen Niederschlagsgeschehens auf die derzeitigen Überschüsse oder Defizite. Auch wenn diese kumulierten Niederschlagsdefizite auf direktem Weg schwierig zu interpretieren sein mögen, so verdeutlichen sie doch anschaulich Perioden mit Niederschlagsdefizit, welche beispielweise auf eine Periode mit Niederschlägen über dem Normalwert folgen. Diese Systeme sind auch hilfreich beim Vergleich der Dauer gegenwärtiger meteorologischer Dürren mit vorangegangenen Dürren am gleichen Standort. Die Größe des Niederschlagsdefizites und seine praktische Bedeutung sind jedoch sehr stark vom Standort abhängig, weshalb sie beispielsweise für die Bewertung von Dürreauswirkungen in der Landwirtschaft nur bedingt geeignet sind.

Wichtig für die Interpretation der Kurven ist das Bewusstsein, dass zu Beginn des Beobachtungsintervalls keine Informationen über das bisherige Niederschlagsdefizit bzw. den Niederschlagsüberschuss vorliegen und von den Normalbedingungen – also Null – ausgegangen wird. In Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Aufzeichnungsbegins wird demnach die „Nulllinie“ innerhalb der Kurve verschoben. Dies ist für die Station Lauenstein in Abbildung 30 für einen um ein Jahr verschobenen Beginn der Niederschlagsreihe dargestellt. Bei der Festlegung von Nass- und Trockenphasen sollte man also bei fehlenden Informationen über die Vorbedingungen nicht auf die Zeiträume ober- und unterhalb der Nulllinie beziehen, sondern nur die Phasen eines positiven bzw. negativen Anstiegs der Kurven betrachten.

Bei der Interpretation kumulativer Anomalien ist weiterhin zu beachten, dass dieser Indikator, wie die meisten anderen meteorologischen Indikatoren, lediglich den gefallenen Niederschlag betrachtet. Wichtige, den Wasserhaushalt wesentlich mitbestimmende Einflüsse, wie das Abflussverhalten, die Bodenbeschaffenheit oder das Verhalten weiterer klimatischer Faktoren (Temperatur, Wind, ...) werden nicht einbezogen. Niederschlagsdefizite bauen sich häufig über längere Zeiträume auf. Dabei müssen nicht immer kurzzeitige starke negative Anomalien aufgetreten sein, sondern es reichen längere Zeiten nur geringfügig unterdurchschnittlicher Niederschlagsmengen aus. Kurze und besonders trockene Abschnitte können durch vorangegangene besonders feuchte Verhältnisse etwas abgepuffert werden, sodass sie sich nicht umgehend auf den Boden- und Grundwasserhaushalt auswirken.

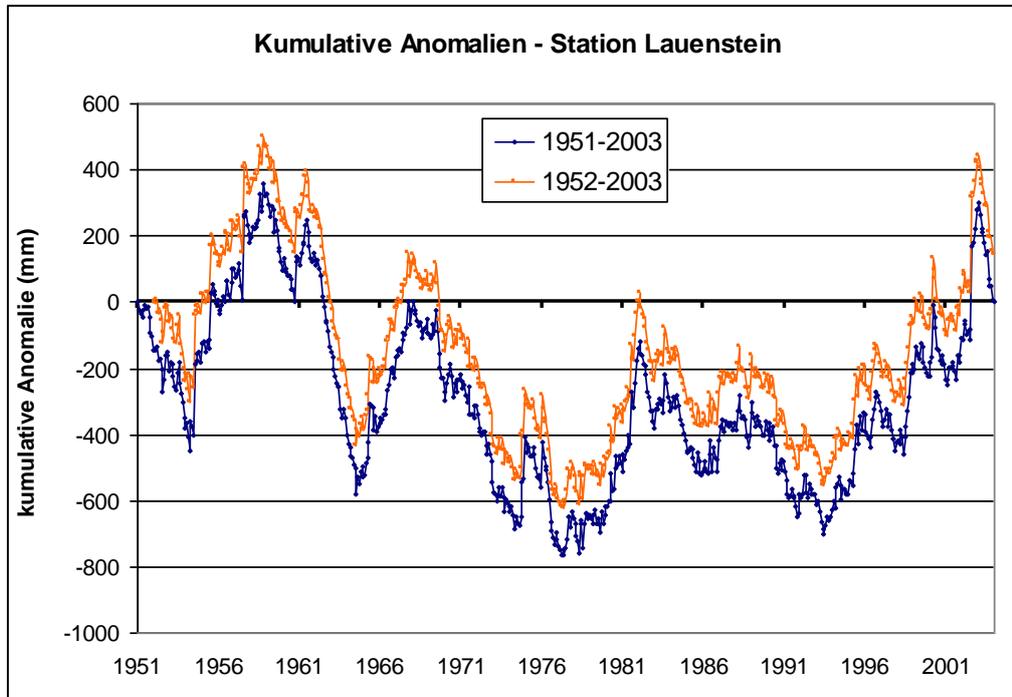


Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung kumulativer Anomalien des Monatsniederschlags an der Station Lauenstein (Erzgebirge) für den Zeitraum 1951–2003 – Vergleich zweier Anfangszeitpunkte der Berechnungen (1951 und 1952)

Anlage 1-7: ‚Niederschlagsanomalienindex‘ (Rainfall Anomaly Index, RAI)

Ein weiterer Index, der - wie der Prozent-vom-Normalen-Ansatz, der Dezil-Index oder der SPI - Niederschlagsanomalien von den mittleren Niederschlagsverhältnissen betrachtet, ist der von VAN ROOY (1965) entwickelte Rainfall Anomaly Index (RAI). Dieser Index bezieht die Rangfolge der Niederschlagswerte ein, um die Größe der positiven und negativen Niederschlagsanomalien zu bewerten.

Er kann auf verschiedenen Zeitskalen über folgende Formel berechnet werden:

$$RAI = \pm 3 \frac{P - \bar{P}}{\bar{E} - \bar{P}}$$

Dabei ist P der jeweils aktuelle Niederschlag (z. B. Monatsniederschlagssumme, Jahreszeitensummen, Jahressumme), \bar{P} der klimatologische Mittelwert (oder besser Median) des Niederschlags (z. B. für 1961–1990 oder besser einen längeren Zeitraum) und \bar{E} der Mittelwert aus den 10 % größten bzw. kleinsten Niederschlagsereignissen, je nachdem, ob positive oder negative Niederschlagsanomalien betrachtet werden (HÄNSEL et al. 2014). Die 3 ist ein Skalierungsfaktor, dessen Vorzeichen für zu feuchte Niederschlagsverhältnisse positiv und für Niederschlagsdefizite negativ ist. Die erhaltenen dimensionslosen Indexwerte können für die einzelnen Stationen anhand des in Tabelle 22 dargestellten Klassifikationsschemas eingeordnet werden. Für die Einordnung regionaler Mittelwerte sind die Schwellenwerte kleiner zu wählen, wobei die letztendliche Schwellenwertgröße von der Größe und Heterogenität der betrachteten Region abhängt.

Tabelle 22: Klassifizierung der Monats-RAI-Werte auf Stationsbasis

Index-Wert	Feuchtezustandsbeschreibung
$RAI > 4,00$	extrem nass
$3,01 \leq RAI \leq 4,00$	deutlich zu nass
$2,01 \leq RAI \leq 3,00$	feucht
$1,01 \leq RAI \leq 2,00$	leicht zu feucht
$-1,00 \leq RAI \leq 1,00$	nahe den Normalbedingungen
$-2,00 \leq RAI \leq -1,01$	leicht zu trocken
$-3,00 \leq RAI \leq -2,01$	trocken
$-4,00 \leq RAI \leq -3,01$	deutlich zu trocken
$RAI < -4,00$	extrem trocken

Die Unterschiede zwischen dem RAI und den komplexeren Indikatoren von PALMER (1965) sowie BHALME & MOOLEY (1980) sind nach Untersuchungen von OLAPIDO (1985) vernachlässigbar. Auch die Unterschiede zum *Standardized Precipitation Index* SPI sind sehr gering. Durch die vorgenommene Normierung ist der SPI jedoch weniger stark zu positiven Niederschlagsanomalien verzerrt. Der RAI liefert v. a. bei stark von der Normalverteilung abweichenden Niederschlagsverteilungen ein verzerrtes Bild und tendiert dazu, die extrem trockenen Bedingungen zu unterschätzen (HÄNSEL et al. 2014).

Anlage 1-8: Dezile (DI)

Für Länder mit besonders großer innerjährlicher Niederschlagsvariabilität wie Australien beobachteten GIBBS & MAHER (1967), dass das Auftreten von Niederschlag innerhalb des ersten Dezils im Zeitraum 1885–1965 sehr gut mit Informationen zum Auftreten von Dürre (FOLEY 1957) übereinstimmte. FOLEY (1957) basierte seine landwirtschaftlichen Bewertungen auf Zeitungs- und andere Berichte zu den Effekten des Niederschlags im Bereich des ersten Dezils auf Ernteerträge und Viehbestandszahlen. In Konsequenz bestimmt der Australische Meteorologische Dienst nun operationell „Niederschlagsdefizite“, anstelle „Dürren“ zu definieren (SIVAKUMAR et al. 2011), wobei ein ernsthaftes Niederschlagsdefizit vorliegt, wenn der Niederschlag über eine kritische Periode hinweg zwischen dem 5. und 10. Perzentil liegt und ein schwerwiegendes Niederschlagsdefizit sich auf Niederschlagssummen unterhalb des 5. Perzentils bezieht (WHITE & WALCOTT 2009, KININMONTH et al. 2000). Dieser Ansatz überwindet auch einige inhärente Probleme, die mit dem Bedarf einer normalisierten Niederschlagsverteilung im ‚Prozent-vom-Normalen‘ Dürreindex verbunden sind.

Die Ermittlung der Dezile erfolgt, indem durch eine Reihung der monatlichen Niederschlagssummen von der höchsten zur niedrigsten eine kumulative Häufigkeitsverteilung erstellt wird. Danach wird diese in 10 Teile aufgeteilt – die Dezile. Das erste Dezil ist der Niederschlagswert, der von den niedrigsten 10 % aller Niederschlagswerte einer Zeitreihe nicht übertroffen wird. Die Dezil-Indizes werden in 5 Klassen eingeteilt, jeweils 2 Dezile pro Klasse und Klassifizierungskriterien zugeteilt (Tabelle 23). Die genaue Berechnung der Dezile erfordert lange Klimazeitreihen (Mindestlänge: 30–50 Jahre).

Die Dezil-Methode (Tabelle 23) wird zur Beschreibung von Dürrezuständen innerhalb des australischen *Drought Watch Systems* verwendet (SIVAKUMAR et al. 2011) und wurden schon recht früh im Rahmen von Dürreentschädigungsprogrammen genutzt (COUGHLAN 1987, SMITH et al. 1993). Gründe dafür sind seine einfache Berechnung – die Methode benötigt weniger Daten und weniger Annahmen als beispielsweise der *Palmer Drought Severity Index* PDSI (SMITH et al. 1993, HAYES 2000). Als Bestandteil der australischen Dürrepolitik werden Erzeuger und Produzenten angewiesen, nur außergewöhnliche Dürreunterstützung in Anspruch

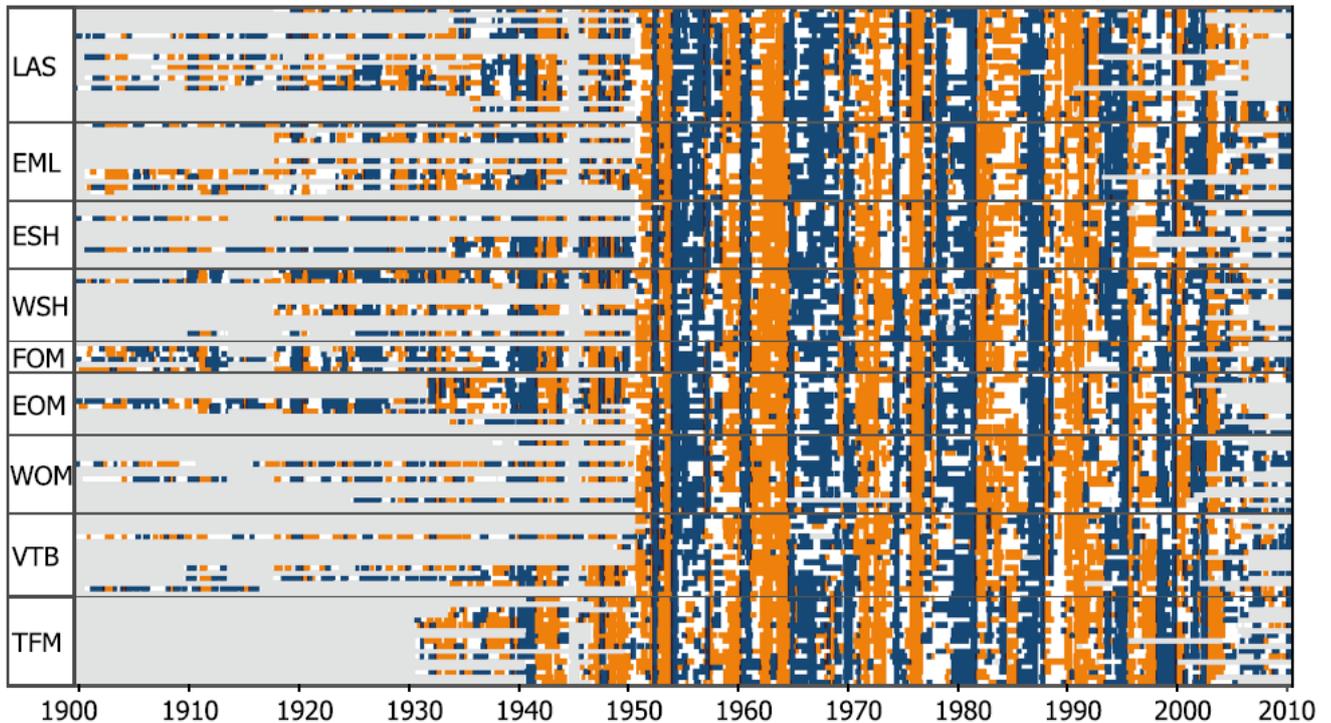
zu nehmen, wenn die Dürre ein Ereignis war, das nur einmal innerhalb von 20-25 Jahren (Dezile 1 und 2 über eine 100-jährige Aufzeichnung) auftritt und länger als 12 Monate andauert hat (WHITE & O'MEAGHER 1995, HAYES 2000). Weil der Dezil-Index, wie viele andere meteorologische Dürreindikatoren auch, die Effektivität des Niederschlags nicht berücksichtigt, kann er für die Bewertung landwirtschaftlicher Dürren unzuverlässig sein.

Tabelle 23: Klasseneinteilung der Dezile mit Beschreibung der Niederschlagsverhältnisse

Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
Dezile 1/ 2	Dezile 3/ 4	Dezile 5/ 6	Dezile 7/ 8	Dezile 9/ 10
Deutlich unter normal	Unter normal	Nahe normal	Über normal	Deutlich über normal

Mittels der auf verschiedenen zeitlichen Skalen berechenbaren Dezile kann auch die Andauer von Dürren bestimmt werden. Dies erfolgt basierend auf gleitend berechneten 3-Monatsniederschlagssummen für welche wiederum die Dezile bestimmt werden. Eine **Dezil-Dürre** beginnt, wenn die 3-Monatsniederschlagssumme in das erste Dezil der Häufigkeitsverteilung der 3-Monatsniederschläge fällt, also zu den 10 % kleinsten Werten gehört (KEYANTASH & DRACUP 2002; KININMONTH et al. 2000, HÄNSEL 2014). Eine solche Trockenperiode endet, wenn der Niederschlag den Bereich zu trockener bzw. mittlerer Niederschlagsverhältnisse verlässt. Zu nasse Verhältnisse werden dabei über zwei Kriterien definiert: 1) der Monatsniederschlag des Vormonates fällt in oder über das 4. Dezil (30 %-Perzentil) der 3-Monatsniederschlagssummenverteilung oder 2) die Niederschlagssumme der vergangenen drei Monate fällt in oder über das 8. Dezil (70 %-Perzentil). Insbesondere die erste Abbruchregel kann in Klimaten mit stark ausgeprägtem Jahreszeitenklima (Regenzeit) problematisch sein, weil hier hohe Monatsniederschlagssummen für bestimmte Zeiten innerhalb des Jahres charakteristisch sind und ein einzelner Monat mit annähernd normalen Niederschlagsverhältnissen nicht notwendigerweise ein Dürreereignis beendet. Dies sollte für Sachsen jedoch kein größeres Problem sein. Obwohl es durch ein Jahreszeitenklima charakterisiert ist, sind die Unterschiede in der Niederschlagsmenge zwischen den Jahreszeiten nicht zu hoch.

Für Sachsen hat HÄNSEL (2014) das Auftreten von Dezil-Dürren und den analog definierten Dezil-Nassperioden für den Zeitraum 1901–2010 untersucht. Dabei identifizierte HÄNSEL (2014) Phasen mit besonders häufigen bzw. langandauernden Dürren. Dies sind 1942–1954, 1959–1964, 1971–1977 und 1988–1993 (Abbildung 31). Diese Charakteristik des alternierenden Auftretens von über mehrere Jahre anhaltenden Phasen mit besonders trockenen bzw. nassen Bedingungen ist zwischen 1950 und 1990 besonders stark ausgeprägt. Davor und danach alternieren die Nass- und Trockenperioden erheblich schneller.



LAS: Lausitz und Spreewald, EML: Elbe-Mulde-Tiefland, ESH: Östliches Sächsisches Hügelland, WSH: Westliches Sächsisches Hügelland, FOM: Erzgebirgsvorland, EOM: Osterzgebirge, WOM: Westerzgebirge, VTB: Vogtland und Thüringer Becken, TFM: Thüringisch-Fränkisches Mittelgebirge

Abbildung 31: Raum-zeitliches Muster des Auftretens von Dezil-Dürren (orange) und Dezil-Nassperioden (blau) an 130 Stationen innerhalb von neun Teilregionen Sachsens für den Zeitraum 1900–2010 (Fehldaten sind grau gekennzeichnet; aus HÄNSEL 2014)

Anlage 1-9: Dürreindex nach Bhalme-Mooley (*Bhalme-Mooley Drought Index, BMDI*)

Der von BHALME & MOOLEY 1980 entwickelte BMDI kann als eine vereinfachte Version des PDSI angesehen werden. Für eine k -monatige Periode ist er definiert als:

$$BMDI = \frac{1}{k} \cdot \sum_{k=1}^k I_k \quad \text{mit dem monatlichen Index } I_k: I_k = c_1 I_{k-1} + c_0 M_k \text{ und } i_0 = 0$$

und der standardisierten Niederschlagsmenge M_k (*moisture index*) für den Monat k :

$$M_k = \frac{p_k - \bar{p}_k}{s_k}$$

Hierbei ist p_k der monatliche Niederschlag mit dem Mittelwert \bar{p}_k und der Standardabweichung s_k . Die zwei Koeffizienten c_1 und c_0 können durch die Festlegung eines BMDI-Wertes von -4 für schwerwiegende historische Dürren und verhältnismäßig höheren Werten für normale Bedingungen (BMDI = 0) geschätzt werden (BHALME & MOOLEY 1980). BHALME & MOOLEY 1980 nutzen für die Monsunzeit in Indien $c_0 = 1/48,55$ und $c_1 = -1,50$. OLAPIDO (1985) ermittelte für die *Great Plains* die Koeffizienten $c_0 = 1/42,67$ und $c_1 = -1,452$.

Abbildung 32 zeigt beispielhaft die monatliche Statistik des größten akkumulierten negativen Index M_k während der Wachstumsphase (Apr–Sep) in den *Great Plains* von Nordamerika. Dabei repräsentiert die durchgezogene Linie die extremen Dürrebedingungen. Der Ordinatenabstand zwischen dieser Linie und der Nulllinie kann durch drei weitere Linien – welche den Übergang zu „schwerer Dürre“, „moderater Dürre“ und „milder Dürre“ markieren – in vier gleich große Teile geteilt werden. Die monatlichen Feuchtebedingungen werden unter Nutzung der gleichen numerischen Werte wie PALMER (1965) in neun Feuchteklassen klassifiziert (Tabelle 24).

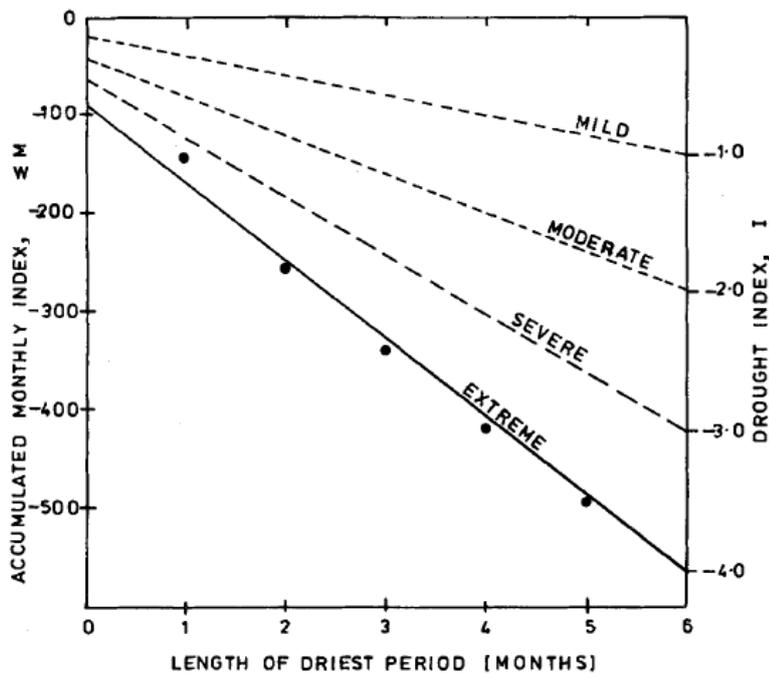


Abbildung 32: Illustration des Zusammenhangs zwischen akkumuliertem Feuchteindex (linke Ordinate) und Größe des BMDI (rechte Ordinate) für verschiedene Akkumulationszeiträume (Abszisse) (aus OLAPIDO 1985)

Tabelle 24: Kategorisierung des Feuchtezustandes nach Größe der BMDI-Werte

Index-Wert	Feuchtezustandsbeschreibung
BMDI > 4	extrem nass
4 > BMDI > 3	sehr nass
3 > BMDI > 2	mäßig nass
2 > BMDI > 1	leicht nass
1 > BMDI > -1	nahe normal
-1 > BMDI > -2	milde Dürre
-2 > BMDI > -3	moderate Dürre
-3 > BMDI > -4	schwere Dürre
-4 > BMDI	extreme Dürre

OLAPIDO (1985) zeigte für die Great Plains Nordamerikas eine vergleichbare Leistungscharakteristik von einfacherem BMDI und komplexerem PDSI.

Anlage 1-10: Standardisierter Anomalien-Index (*Standardized Anomaly Index, SAI*)

KATZ & GLANTZ (1986) nannten den Niederschlagsindex, der bis dato v. a. in den dürreanfälligen Gebieten der westlichen Sahelzone und dem Nordosten Brasiliens häufig angewendet wurde, Standardisierter Anomalienindex SAI. Der Index standardisiert den Jahres- oder auch Jahreszeitenniederschlag P mit dem langzeitlichen Mittelwert \bar{P} und der Standardabweichung σ :

$$SAI = \frac{P - \bar{P}}{\sigma}$$

Die Indexwerte der vorhandenen i Stationen werden dann nach KATZ & GLANTZ (1986) über die gesamte betrachtete Region gemittelt, sodass pro Jahr(eszeit) nur ein Indexwert vorliegt:

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SAI_i \quad \text{mit } n = \text{Gesamtzahl der Stationen.}$$

KATZ & GLANTZ (1986) diskutieren die statistischen Eigenschaften des Index sowie mögliche Variationen und Verbesserungen wie beispielsweise unterschiedliche Gewichtungen der Stationen im Gesamtindex.

Anlage 1-11: NOAA-Dürreindex (NOAA Drought Index NDI)

Der NOAA-Dürreindex wurde von STROMMEN & MOTH (1987) als Frühwarnsystem für landwirtschaftliche Dürre in Entwicklungsländern entwickelt. Es sollte ein einfaches und kostengünstiges Mittel für die Beobachtung landwirtschaftlicher Dürre sein. Er wird für wöchentliche Niederschlagssummen berechnet. Diese werden gleitend auf 8 Wochen aufsummiert und mit den jeweiligen aufsummierten Mittelwerten (für einen mindestens 30 Jahre langen Zeitraum) verglichen (TITLOW 1987). Wenn der aktuelle Niederschlag größer als 60 % des Normalwertes für die 8-Wochenperiode, dann geht man davon aus, dass die aktuelle Woche (Woche 8) keinen oder nur wenig Wasserstress hat (TITLOW 1987). Wenn ein 8-Wochenblock jedoch weniger als 60 % des Normalniederschlags erhalten hat, liegt Wasserstress vor. Nun werden die weiteren Wochen zu dem 8-Wochenniederschlag addiert, bis das Feuchtigkeitsdefizit wieder aufgehoben ist (aktueller Niederschlag > 60 % des Normalen; TITLOW 1987). Nun wird wieder mit einem 8-Wochenblock weitergerechnet.

Anlage 1-12: Hutchinson-Dürreschwereindex (Hutchinson Drought [Severity] Index, HDSI)

Der Hutchinson Dürre(Schwere)-Index ist ein nur auf Niederschlagsdaten basierender klimatischer Dürreindex, der für die Wiedergabe landwirtschaftlicher Dürren entwickelt wurde. Der Index zählt die aufeinanderfolgenden Monate mit Niederschlägen unterhalb des Medians, basierend auf Perzentilen der Niederschlagsaufzeichnungen (SMITH et al. 1992).

Aus den Monatsniederschlagsdaten werden gleitend 6-Monatsniederschlagssummen berechnet, die dann monatsweise zu Perzentilen geordnet werden. Um dem Wertebereich des Palmer Dürreschwereindex zu entsprechen (und dessen Klassifizierung des Feuchtigkeitsregimes nutzen zu können), erfolgt eine Reskalierung der Daten auf den Bereich -4 bsi +4. SMITH et al. (1993) berechneten für jeden Monat neben den 6-monatigen auch die 12-monatigen Perzentile als den Hutchinson Dürreschwere-Index (HDSI).

HANIGAN et al. (2012) verwendeten den Hutchinson-Index, um die mögliche Verbindung zwischen Dürreereignissen und Selbstmordraten in ländlichen Regionen von *New South Wales* in Australien zu untersuchen.

Anlage 1-13: Standardisierter Niederschlagsindex (Standardized Precipitation Index, SPI)

Der SPI betrachtet nur den Parameter Niederschlagsmenge, der basierend auf Langzeitniederschlagsdatenreihen in Häufigkeiten umgewandelt wird. Daran wird eine Verteilung (zumeist die Gamma-Verteilung) angepasst. Die Wahrscheinlichkeiten werden in eine standardisierte Reihe transformiert mit einem Mittelwert von Null und einer Standardabweichung von 1.

Die Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Berechnung des SPI beeinflusst die SPI-Werte. Zudem zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Niederschlagsreihen in Abhängigkeit von den betrachteten Zeitskalen signifikante Veränderungen (VICENTE-SERRANO 2006). Zu den am häufigsten verwendeten Verteilungen gehören die Gammaverteilung (MCKEE et al. 1993; EDWARDS & MCKEE 1997; MISHRA & SINGH 2009), die Pearson Type III Verteilung (GUTTMAN 1999; VICENTE-SERRANO 2006; QUIRING 2009) sowie die lognormale-Verteilung, die Extremwertverteilung und die exponentielle Verteilung (LLOYD-HUGHES & SAUNDERS 2002; MADSEN et al. 1998; TODOROVIC & WOOLHISER 1976; WU et al. 2007). Bei der Berechnung des SPI für längere Zeitskalen

(> 24 Monate) treten zwei Probleme auf: Zunächst kann durch die begrenzte Länge der Datenreihe die Anpassung der Verteilung etwas verzerrt sein (z. B. LLOYD-HUGHES & SAUNDERS 2002; SONMEZ et al. 2005). Zum anderen treten Probleme in trockenen Klimaten auf, wo der Niederschlag saisonal auftritt und in der Trockensaison Monatsniederschlagssummen von Null häufig auftraten (MISHRA & SINGH 2010). In diesen Klimazonen sind die berechneten SPI-Werte auf kurzen Zeitskalen nicht normalverteilt, weil die darunterliegende Niederschlagsverteilung zu schief gewesen ist und die Gammaverteilung begrenzt.

Die Eignung der Gammaverteilung für das Gebiet Mitteleuropas wurde in einer paneuropäischen Studie von LLOYD-HUGHES & SAUNDERS (2002) gezeigt, die verschiedene Verteilungsfunktionen getestet haben. LLOYD-HUGHES & SAUNDERS (2002) geben auch einen detaillierten Überblick über die Berechnung des SPI.

In Regionen der Vereinigten Staaten wurde nachgewiesen, dass der SPI aufkommende Dürren schneller identifizieren kann als der PDSI. Dementsprechend wird er in den USA, insbesondere von Wasserressourcenmanagern, häufig zur Frühwarnung von Dürren eingesetzt und hilft auch bei der Einschätzung der Schwere von Dürren (HAYES et al. 1999, HAYES 2000). Insbesondere für die Anwendung in Entwicklungsländern mag der SPI aufgrund seiner geringen Datenansprüche und der relativen einfachen Berechnung besonders nützlich sein (v. a. im Vergleich zum PDSI). Wie viele andere rein niederschlagsbasierte Indikatoren ist der SPI eher für das Monitoring von meteorologischen und hydrologischen Dürren geeignet als für die Bewertung landwirtschaftlicher Dürren. Durch seine Flexibilität hinsichtlich der Auswahl von mit der Wachstumsaison korrespondierenden Berechnungszeiträumen ist er aber auch für die Bewertung einiger Aspekte landwirtschaftlicher Dürre nützlich. Für landwirtschaftliche Anwendungen werden zumeist die kurzen Zeitskalen von 3-6 Monaten genutzt (ROUAULT & RICHARD 2003; JI & PETER 2003; ROSSI & NIEMEYER 2012, VERGNI & TODISCO 2011). Dabei verwendeten beispielweise VERGNI & TODISCO 2011 den SPI-6 des Monats März (Oktober-März) als Repräsentant für die Niederschlagsanomalien der Nasszeit und des Monats September (April-September) für die Wachstumsaison. Zur Beschreibung der Niederschlagsanomalie der Berechnungssaison verwendeten sie den SPI-4 für den August (Mai-August). Für hydrologische Anwendungen werden eher SPI-Werte auf der Zeitskala von 12+ Monaten verwendet (GUTTMAN 1999; HAYES ET AL. 1999; HEIM 2002).

Bezogen auf Wasserressourcen wurden die Vorteile des SPI in verschiedenen Studien illustriert (SZALAI et al. 2000; VICENTE-SERRANO & LÓPEZ-MORENO 2005; KHAN et al. 2008; FIORILLO & GUADAGNO 2010; LORENZO-LACRUZ 2010). Einige Studien haben auch Variationen in der Reaktion von landwirtschaftlichen (VICENTE-SERRANO et al. 2006; QUIRING & GANESH 2010) und ökologischen (JI & PETER 2003; VICENTE-SERRANO 2007; PASHO et al. 2011) Variablen auf unterschiedliche Zeitskalen des SPI aufgezeigt.

Aufgrund seiner soliden theoretischen Entwicklung, Robustheit und Vielseitigkeit in Dürreanalysen wurde der SPI während der letzten beiden Dekaden zunehmend verwendet (REDMOND 2002).

Weiterentwicklungen des SPI: Für verschiedene Regionen wurde die Berechnungsprozedur des SPI leicht abgewandelt, um die Performance des SPI zu verbessern bzw. Problemen in der korrekten Wiedergabe von Dürreverhältnissen zu begegnen. Dazu gehört der so genannte SPI-DWD, der von PIETZSCH & BISSOLLI (2011) beschrieben wurde.

Anlage 1-14: Nationaler Niederschlagsindex (National Rainfall Index, RI)

Der von GOMMES & PETRASSI (1994) vorgeschlagene nationale Niederschlagsindex NRI ist definiert als der nationale Mittelwert des jährlichen Niederschlages, gewichtet mit seinem Langzeitmittelwert. Dabei erfolgt die Berechnung auf der Nordhalbkugel für das Kalenderjahr (Januar–Dezember) und für die Südhalbkugel aufgrund der jahresübergreifenden Agrarsaison für den Zeitraum Juli–Juni. Durch die Verwendung des Lang-

zeitmittelwertes als Wichtungsfaktor bekommt der Niederschlag in nasseren Gebieten ein größeres relatives Gewicht als in trockenen Gebieten, was in einer guten Korrelation mit Ernteerträgen resultiert – insbesondere für die Spitzenwerte und die tiefen Werte. Quantitativ gesehen ist die Beziehung jedoch aufgrund des Einflusses von Bewässerung, Technologietrends, Schädlingsbefall und Pflanzenkrankheiten auf die Erträge nicht so gut.

Der NRI kann als Indikator für die Qualität der Agrarsaison verwendet werden. Durch seine Definition als nationaler Wert kann er für den Vergleich zwischen Ländern und Jahren verwendet und auch mit anderen nationalen statistischen Indikatoren verglichen werden.

Anlage 1-15: Dürreschwereindex (*Drought Severity Index, DSI*)

Zur Entwicklung des Dürreschwereindex DSI nutzen PHILLIPS & MCGREGOR (1998) das Konzept der monatlich akkumulierten Niederschlagsdefizite von BRYANT et al. (1992). Sie berechneten basierend auf den monatlichen Niederschlagsanomalien gegenüber der Klimareferenzperiode 1961–1990 den Dürreschwereindex für 3 (DSI3) und für 6 (DSI6) Monate. Die Berechnung des DSI wird hier für den DSI3 beschrieben – für den DSI6 erfolgt sie analog. Eine Dürresequenz beginnt, wenn die Niederschlagsanomalie des Monats t (X_t) negativ ist (sprich unterhalb des Normalniveaus liegt) und der 3-Monatsniederschlag für die Monate t , $t-1$ und $t-2$ unterhalb seines 3-Monats-Mittelwertes liegt (PHILLIPS & MCGREGOR 1998). Der Dürreschwereindex bekommt dann den positiven Wert des Niederschlagsdefizites in Monat t zugeordnet. Für jeden darauffolgenden Monat wird die Niederschlagsanomalie entweder auf den bisherigen DSI3 addiert (im Falle negativer Anomalien sprich Niederschlagsdefizite) oder abgezogen (für positive monatliche Niederschlagsanomalien) unter der Bedingung, dass der jeweilige Dreimonatsniederschlag weiterhin unterhalb des Mittelwertes bleibt. Die Dürreperiode endet, sobald die Dreimonatsniederschlagsanomalie positiv ist – dem DSI3 wird dann der Wert Null zugewiesen:

$$DSI3_t = DSI_{t-1} - (P_t - \bar{P}_t) \text{ solange } P_{t,t-1,t-2} - \bar{P}_{t,t-1,t-2} < 0; \text{ sonst } DSI_t = 0-$$

Für den Vergleich der Dürreschwere zwischen verschiedenen Stationen müssen die absoluten Niederschlagsdefizite, in denen der DSI bisher ausgedrückt ist, korrigiert werden. Die Standardisierung des Index ($DSI3_s$) erfolgt durch die Division des absoluten Defizites durch den mittleren Jahresniederschlag P_a an der Station:

$$DSI3_s = DSI3 / P_a \times 100$$

Die Verwendung des sechsmonatigen Index DSI6, anstelle des dreimonatigen DSI3 verhindert das Einsetzen einiger Dürresequenzen und vermindert damit die Zahl der beobachteten Dürren (PHILLIPS & MCGREGOR 1998). Die mittlere Länge der Dürren und die Wahrscheinlichkeit, dass eine Dürresequenz akute Defizite erreicht steigen dagegen an. Allgemein gesprochen hat der DSI3 die Fähigkeit, sich entwickelnde Niederschlagsdefizite schnell zu entdecken, jedoch tendiert er dazu, Dürresequenzen frühzeitig abubrechen. Nach den DSI6-Regeln bestimmte Dürren sind tendenziell persistenter, jedoch hinken sie den über die DSI3-Regeln identifizierten zeitlich hinterher. PHILLIPS & MCGREGOR (1998) glauben daher, dass der größte durch den DSI6 erreichte Wert ein repräsentativeres Maß für die Schwere eines Dürreereignisses ist als der DSI3-Wert.

Der Dürreschwereindex wird häufig im Vereinigten Königreich Großbritannien verwendet (NIEMEYER 2008)

Anlage 1-16: Trockenheitsindex nach DE MARTONNE (auch Ariditätsindex, dMI)

Um die Bedeutung des Niederschlags für Pflanzen bewerten zu können, muss die Niederschlagshöhe zusammen mit anderen klimatologischen Größen betrachtet werden. Beispielsweise kann eine jährliche Niederschlagshöhe von 600 mm, die in Mitteleuropa noch für Waldbedeckung ausreichend ist, im heißen Afrika

meist nur eine trockene Steppe unterhalten. Es sind daher verschiedene Indizes entwickelt worden, um die pflanzenphysiologische Wirkung des Niederschlags in unterschiedlichen Klimaten zu bewerten. Eine gut brauchbare und einfach zu berechnende Größe hierfür ist der Trockenheitsindex dMI nach DE MARTONNE (1926). Er ist definiert als:

$$dMI = P/(T+10)$$

wobei P: der Niederschlag des Bezugszeitraums in mm und
T: die Mitteltemperatur des Bezugszeitraums in Grad C ist.

Bezugszeiträume können das ganze Jahr, Halbjahre, Jahreszeiten oder Monate sein. Kleinere Werte zeigen trockenere Gebiete an.

Der Trockenheitsindex nach DE MARTONNE liefert eine sehr ähnliche räumliche Verteilung trockener Gebiete (Tieflandsgebiete, während Gebirge als weniger trockene Gebiete hervortreten) wie die klimatische Wasserbilanz und zeigt auch einen ähnlichen Jahresgang mit hohen Indexwerten (geringe Trockenheit) von November bis März und dem September als trockensten Monat (MÜLLER-WESTERMEIER 2000).

Vom Meteorologischen und Hydrologischen Dienst der DDR (1953) wird für den Trockenheitsindex eine Grenze der „biologischen Trockenheit“ von $dMI \leq 20$ angegeben.

Anlage 1-17: Hydro-thermaler Seljaninow-Koeffizient (HTC)

Der hydrothermale Selyaninov-Koeffizient (SELYANINOV 1937) bezieht sich auf den Quotienten von Niederschlagssumme und Temperatursumme. Er wird in der Regel für die Wachstumsaison berechnet. Der Index kann gleitend auf der Basis von Tageswerten berechnet werden oder für die gesamte Wachstumsaison:

$$HTC = P/0,1 \sum T$$

MEHLER et al. (2014; KLAPS-Projekt) verwendeten zur Charakterisierung der Wachstumsaison den Zeitraum mit mittleren täglichen Lufttemperaturen von $> 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Ansatz wird zur Charakterisierung der Evapotranspiration verwendet und die Indexwerte können von feuchten bis sehr trockenen Verhältnissen klassifiziert werden (Tabelle 25). Die Abteilung Agrarmeteorologie des DWD verwendet den Index auf Kundenwunsch in täglicher Auflösung.

Tabelle 25: Wasserverfügbarkeit für die Vegetation in Abhängigkeit vom HTC-Wert (MEHLER et al. 2014)

Indexwert	0,4–0,7	0,7–1,0	1,0–1,3	> 1,3
Beschreibung	sehr trocken	trocken	mäßig trocken	feucht

Anlage 1-18: ‚Reconnaissance-Dürreindex‘ (Reconnaissance Drought Index, RDI)

Der Reconnaissance-Dürreindex RDI kann als eine Erweiterung des Standardisierten Niederschlagsindex SPI verstanden werden. Er setzt jedoch den Niederschlag vor Ort der Evapotranspiration gegenüber. Durch Standardisierung und Normalisierung werden die gleichen Dürreschwereklassen wie beim SPI erreicht.

Berechnet wird der Reconnaissance-Dürreindex RDI aus dem Verhältnis von Niederschlag (P) zur potenziellen Evapotranspiration (PET) (TSAKIRIS & VANGELIS 2005). Der RDI erscheint in drei Formen: dem Ausgangswert a_k , dem normalisierten RDI_n und dem standardisierten RDI_{st} . In seiner standardisierten Form reagiert der RDI in den meisten Fällen ähnlich wie der SPI und es werden die gleichen Schwellenwerte zur Bestimmung der Dürrestärkeklassen verwendet (TSAKIRIS & VANGELIS 2005; TSAKIRIS et al. 2006). Der RDI wurde ursprünglich für 12-Monatszeiträume berechnet. Er kann jedoch auch für Perioden von 3, 6 und 9 Monaten verwendet

werden. Der RDI für einen 12-Monatszeitraum kann direkt mit dem Ariditätsindex (berechnet nach UNEP 1992: $AI = P/ETP$) für die gleiche Region verglichen werden. Wenn a_{12} für ein bestimmtes Jahr geringer als der Ariditätsindex ist, dann leidet die Region in diesem Jahr unter Dürre.

Die Ermittlung des RDI beinhaltet folgende Berechnungsschritte (TSAKIRIS & VANGELIS 2005). Zunächst wird der Ausgangswert a_k für den Index einer bestimmten Periode, die durch den Endmonat k während des Jahres gekennzeichnet ist, berechnet:

$$a_k = \sum_{j=1}^{j=k} P_j \bigg/ \sum_{j=1}^{j=k} PET_j$$

Dabei sind P_j und PET_j der Niederschlag und die potenzielle Evapotranspiration für den j -ten Monat des hydrologischen Jahres. Die Gleichung kann auch für andere Startmonate oder andere Zeiträume des Jahres berechnet werden.

Anschließend wird der erhaltene Ausgangswert mit dem Mittelwert (z. B. über die Klimanormalperiode hinweg) normalisiert. Man erhält den normalisierten Indexwert RDI_n :

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1$$

Als letzter Schritt wird der RDI unter der Annahme, dass a_k einer lognormalen Verteilung folgt, standardisiert (RDI_{st}). Das Vorgehen ist ähnlich dem bei der Berechnung des SPI verwendeten:

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_k} - 1 \text{ mit } y_k = \ln a_k.$$

Dabei ist \bar{y}_k ist der Mittelwert und $\hat{\sigma}_k$ die Standardabweichung von y_k .

Verschiedene Studien (z. B. TIGKAS 2008; TSAKIRIS et al. 2008) haben gezeigt, dass an verschiedenen Orten und auf verschiedenen getesteten Zeitskalen die Werte von a_k sowohl der Lognormal- als auch der Gamma-verteilung befriedigend gut folgen. Der RDI_{st} wird daher in einigen Studien auch über die Gammaverteilung berechnet.

Bei sehr kleinen Werten der potenziellen Verdunstung führt der Berechnungsansatz des RDI zu sehr großen Werten, im Falle von $ETP=0$ ist er gar nicht mehr definiert. Damit ist er in sehr kalten Klimaten nicht anwendbar.

TSAKIRIS & VANGELIS (2005) erklären, dass ihr Index dem SPI gegenüber gewisse Vorteile hat, weil er Defizite im Wasserhaushalt besser repräsentieren kann als ein rein niederschlagsbasierter Index. VANGELIS et al. (2013) untersuchten vier verschiedene Berechnungsmethoden für die potenzielle Evapotranspiration (Hargreaves, Thornthwaite, Blaney–Criddle and FAO Penman–Monteith [nur T]) hinsichtlich des Einflusses auf die RDI-Werte. Sie fanden, dass die Wahl des Berechnungsansatzes für die ETP keinen signifikanten Einfluss auf die RDI-Werte hat und schlussfolgerten, dass der RDI ein robuster Ansatz für die Bewertung der Schwere von Dürren ist. Nach VANGELIS et al. (2013) wird der RDI aufgrund seiner geringen Datenanforderungen sowie seiner großen Sensitivität und Resilienz zunehmend in ariden und semiariden Gebieten verwendet.

Der RDI wurde in einer Reihe von Studien (FARAJALLA & ZIADE 2010; ZARCH et al. 2011, ELAGIB & ELHAG 2011; KIRONO et al. 2011, KOUSARI et al. 2014) zumeist im mediterranen bis ariden Gebieten verwendet und durch KHALILI (2011) für verschiedene Klimazonen mit dem SPI verglichen.

Anlage 1-19: ‚Akkumulierter Dürreindex‘ (*Accumulated Drought Index ADI*)

Inputgrößen für diesen Index sind der Niederschlag (P) und die potenzielle Verdunstung (PET). Seine Berechnung basiert auf dem Verhältnis zwischen beiden Variablen. Je nachdem wie groß der Niederschlag im Verhältnis zur potenziellen Evapotranspiration ist, erhält der Dürreindex DI für jeden Zeitschritt n eine Größe zwischen 1 (trocken) und 5 (nass). Die fünf Kategorien des P-ETP-Verhältnisses sind in Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 26: Verhältnis von P zu ETP zur Bestimmung des Dürreindex DI (nach CIIAGRO/IAC/Brasilien in SIVAKUMAR et al. 2011)

P-ETP-Beziehung	Feuchtezustandsbeschreibung	DI
$P \geq 2 \text{ ETP}$	nass	5
$\text{ETP} \leq P < 2 \text{ ETP}$	etwas nass	4
$\frac{1}{2} \text{ ETP} \leq P < \text{ETP}$	normal	3
$0 \leq P < \frac{1}{2} \text{ ETP}$	etwas trocken	2
$P = 0$	trocken	1

Aus den bestimmten DI-Werten wird für die n-Zeitschritte der akkumulierte Dürreindex berechnet:

$$\text{ADI} = \sum \text{DI} / (3 \text{ n N})$$

Dabei ist N die Zahl der Zeitschritte mit Niederschlägen > 10 mm. Für N = 0 wird der ADI berechnet durch

$$\text{ADI} = \sum \text{DI} / (3 \text{ n})$$

Die Werte des ADI werden dann entsprechend der Einteilung in Tabelle 27 klassifiziert.

Tabelle 27: Akkumulierter Dürreindex (ADI) und Dürreklassifikation (CIIAGRO/IAC/Brasilien in SIVAKUMAR et al. 2011)

ADI-Werte	Feuchtezustandsbeschreibung
$\text{ADI} \geq 1,50$	extrem nass
$0,80 \leq \text{ADI} < 1,50$	sehr nass
$0,40 \leq \text{ADI} < 0,80$	nass
$0,20 \leq \text{ADI} < 0,40$	normal
$0,04 \leq \text{ADI} < 0,20$	trocken
$\text{ADI} < 0,04$	sehr trocken

Anlage 1-20: Standardisierter Niederschlags-Evapotranspirations-Index (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI*)

Der von VICENTE-SERRANO et al. (2010a) entwickelte Standardisierte Niederschlags-Evapotranspirationsindex SPEI kombiniert Niederschlags- und Temperaturdaten. Seine Berechnung basiert auf der Berechnungsmethodik des SPI unter Nutzung der monatlichen (oder wöchentlichen) Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration – sprich der klimatischen Wasserbilanz (THORNTON 1948) – anstelle des Niederschlags. Dabei ist die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration schwierig, weil er vielfältige Parameter beinhaltet. Es existieren verschiedene Ansätze zur direkten Berechnung der potenziellen Verdunstung aus meteorologischen Daten.

Aus Gründen der weltweiten Datenverfügbarkeit nutzen bisher die meisten Studien die Thornthwaite-Gleichung zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration, welche nur Daten der mittleren Temperatur benötigt. Diese Methode hat jedoch einige Defizite verlässliche Schätzer der Variable zu erhalten (z.B. DONO-

HUE et al. 2010). Weitere Verbesserungen des SPEI, inklusive der Verwendung verlässlicherer PET-Schätzer basierend auf den Gleichungen von Hargreaves oder Penman–Monteith, könnten die Rolle, welche die potenzielle Verdunstung hinsichtlich der Schwere von Dürren hat, besser wiedergeben und somit den SPEI noch passender für die Identifikation dürreverbundener Auswirkung auf verschiedene System machen (VICENTE-SERRANO et al. 2012a).

Der SPEI kann nicht mehr wie der SPI unter Nutzung einer zweiparametrischen Verteilung berechnet werden, weil die klimatische Wasserbilanz auch negative Werte annehmen kann. Daher wird eine dreiparametrische Verteilung benötigt. VICENTE-SERRANO et al. (2010a) testeten vier Verteilungen (Pearson III, log-normal, Generelle Extremwertverteilung und log-logistisch). Unter verschiedenen klimatischen Bedingungen waren nach dem Kolmogorov-Smirnoff Test alle vier für alle getesteten Zeitskalen (1 bis 24 Monate) „passend“. Die Autoren bewerteten aufgrund der großen Ähnlichkeit der vier Verteilungen die Auswahl der „optimalen“ Verteilungsfunktion als schwierig. Unter Nutzung des Verhaltens bei den extremsten Werten als Auswahlkriterium bewerteten VICENTE-SERRANO et al. (2010a) die log-logistische Verteilung als die geeignetste für die Standardisierung der klimatischen Wasserbilanz. Für die Klassifizierung des Feuchtigkeitszustandes wird das gleiche Schema wie für den SPI (Tabelle 1) verwendet.

Die Berechnung des SPEI ist beispielsweise in dem R-Paket SPEI (<http://cran.r-project.org/web/packages/SPEI>) implementiert. Hier stehen drei Methoden zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration zur Verfügung (Thornthwaite, Hargreaves und FAO-56 Penman-Monteith). Zusätzlich gibt es in Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit drei verschiedene Optionen für die FAO-56 Penman-Monteith-Gleichung. So kann der Code beispielsweise die Solarstrahlung aus der Sonnenscheindauer oder der prozentualen Wolkenbedeckung schätzen. Falls der Wasserdampfdruck nicht vorliegt, kann der Code ihn aus der Taupunkttemperatur, der relativen Luftfeuchte oder der Minimumtemperatur schätzen (geordnet nach steigender Unsicherheit der Methode).

Basierend auf dem SPEI ist ein globales Dürremonitoringprodukt in Echtzeit verfügbar (<http://sac.csic.es/spei/map/maps.html>). Dort sind Karten für die gesamte Erde in einer räumlichen Auflösung von 0,5° verfügbar für SPEI-Zeitskalen von 1 bis 48 Monaten. Der globale SPEI-Dürremonitor erlaubt auch die grafische Darstellung der zeitlichen Änderung des SPEI an vom Anwender ausgewählten Orten. Zudem können die SPEI-Zeitreihen für spezifische Punkte oder Gebiete im netCDF Format heruntergeladen werden. Für dieses SPEI-Produkt wird die Thornthwaite-Gleichung zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration genutzt, weil die für die Berechnung der ETP nach der FAO-56 Penman-Monteith- oder Hargreaves-Gleichung notwendigen Daten nicht global in Echtzeit verfügbar sind.

Anlage 1-21: Global anwendbarer Dürreindex (GPCC-DI)

Vom beim Deutschen Wetterdienst angesiedelten Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie wurde kürzlich ein Dürreindex vorgeschlagen, der den SPI und den SPEI kombiniert und damit eine recht gute weltweite Abdeckung erreicht (ZIESE 2014; ZIESE et al. 2014). Die Motivation für die Entwicklung dieses neuen Index ist, dass sowohl der SPI als auch der SPEI nicht global anwendbar sind. Für beide Indizes muss eine Verteilungsfunktion angepasst werden, deren Fitting nicht in allen klimatischen Regionen gleichermaßen gut funktioniert. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Verteilung der Niederschlagswerte für die SPI-Berechnung am besten durch eine Gammafunktion angepasst wird. Dies ist in sehr trockenen Gebieten problematisch, weil hier das Maximum der Gammafunktion verschwindet und diese in eine monoton fallende Funktion übergeht (ZIESE 2014). Auch in relativ trockenen Regionen wie dem Mittelmeerraum ist die Anwendung des SPI eingeschränkt, da er hier auch unter normalen Bedingungen immer zu feucht indiziert. Dies wurde durch eine korrigierte SPI-Version des DWD (SPI-DWD, PIETZSCH & BISSOLLI 2011) abgemildert. Jedoch ist der SPI immer noch nur in Gebieten mit ausreichend hohen Niederschlagsmengen anwendbar.

Für die Berechnung des SPEI wird eine Verteilungsfunktion an die Differenz zwischen Niederschlag und ETP angepasst. Im Gegensatz zum SPI sind nun keine mathematischen undefiniertheiten mehr möglich (ZIESE 2014). Weil es keine globalen Messungen der ETP gibt, die eine einfache Weiterverarbeitung ermöglichen, muss die ETP berechnet werden. Die einzige für solche automatisierten Anwendungen der zeitnahen Datenbereitstellung geeignete Methode ist die Thornthwaite-Methode (THORNTHWAITE 1948), weil sie nur auf der Monatsmitteltemperatur und einfach zu berechnenden Größen wie der Sonnenhöhe beruht (ZIESE et al. 2014). Problematisch wird es, wenn die Monatsmitteltemperatur nahe oder unter null Grad Celsius ist, dann ergibt die Parametrisierung von Thornthwaite keine sinnvollen Ergebnisse für die ETP. Der SPEI kann daher nur in warmen und tropischen Regionen operationell berechnet werden.

Weil der SPI-DWD und der SPEI in den Gebieten, wo beide Indizes berechenbar sind, vergleichbare Ergebnisse liefern, ist eine Kombination beider Indizes möglich, um eine nahezu globale Abdeckung zu erreichen. Einzig die kalten Wüsten können so noch nicht erfasst werden. Der kombinierte Index GPCC-DI ergibt sich aus dem jeweils berechenbaren Index (SPI oder SPEI); sollten beide Indizes berechenbar sein, so wird ihr Mittelwert verwendet. Der GPCC-DI wird für Akkumulationszeiträume von 1, 3, 6 und 9 Monaten sowie 1, 2 und 4 Jahren berechnet. Dies erfolgt in der Regel am 10. Tag des Folgemonats. Die Ergebnisse sind im Internet abrufbar (ftp://ftp.dwd.de/pub/data/gpcc/html/gpcc_di_doi_download.html).

Anlage 1-22: Palmer Dürrestärkeindex (Palmer Drought [Severity] Index; Palmer; PDSI/PDI)

Der PDSI wird basierend auf monatlichen Niederschlags- und Temperaturdaten sowie dem lokal verfügbaren Wassergehalt (AWC) des Bodens unter Nutzung eines Zwei-Schicht-Boden-Modells berechnet. Aus diesen Eingaben können alle grundlegenden Terme der Wasserhaushaltsgleichung bestimmt werden, einschließlich Evapotranspiration, Bodenwasseranreicherung, Abfluss und Feuchtigkeitsverlust aus der Oberflächenschicht (SIVAKUMAR et al. 2010). Menschliche Einflüsse auf die Wasserbilanz wie beispielsweise Bewässerung werden nicht berücksichtigt. Von dem Modell werden auch Prozesse wie die Schnee-Akkumulation oder die Schneeschmelze und der Einfluss gefrorener Böden vernachlässigt. Die komplette Beschreibung der hinter dem Index stehenden Gleichungen kann in der Originalstudie von PALMER (1965) oder einer ganzen Reihe jüngerer Publikationen (z. B. KARL 1983, ALLEY 1984, KARL 1986) nachgelesen werden.

Der PDSI variiert grob gesehen zwischen -6,0 und + 6,0. Feuchtere Bedingungen werden durch positive und trockenere durch negative Werte des PDSI angezeigt (genaue Klassifizierung siehe Tabelle 28). Palmer wählte die Klassifikationsskala der Feuchtebedingungen willkürlich, basierend auf seinen ursprünglichen Untersuchungsgebieten (Zentral-Iowa, West-Kansas; PALMER 1965). Der Palmer Index ist so entwickelt, dass eine -4,0 in South Carolina und in Idaho im Idealfall die gleiche Bedeutung bezüglich der Feuchteabweichung von den normalen klimatologischen Bedingungen hat (ALLEY 1984).

Die PDSI-Werte werden normalerweise auf monatlicher Basis berechnet. Die weitere Interpretation der monatlichen PDSI erlaubt auch die Einbeziehung der Dürreandauer. Eine Dürreperiode wird als Abfolge von mindestens drei aufeinanderfolgenden Monaten mit PDSI-Werten unter -2,0 interpretiert. Eine Folge von mindestens sechs Monaten ist ein bedeutendes Dürreereignis. Eine Dürre endet, wenn in einem Monat die -2,0 wieder überschritten werden.

Tabelle 28: Klassifikation des Palmer-Index

Index-Wert	Feuchtezustandsbeschreibung
PDSI > 4,0	extrem nass
3,99 > PDSI > 3,0	sehr nass
2,99 > PDSI > 2,0	Nass
1,99 > PDSI > 1,0	Feucht
0,99 > PDSI > 0,5	beginnende Feuchtperiode
0,49 > PDSI > -0,49	nahe normal
-0,5 > PDSI > 0,99	beginnende Trockenperiode
-1,0 > PDSI > -1,99	milde Dürre
-2,0 > PDSI > -2,99	moderate Dürre
-3,0 > PDSI > -3,99	schwere Dürre
-4,0 > PDSI	extreme Dürre

Genutzt wird der Palmer-Index durch viele US-Regierungsbehörden und -Staaten im Rahmen des Managements, der Planung und des Monitorings von Dürren. Besonders effektiv ist er in der Messung von Auswirkungen, die sensitiv gegenüber den Bodenfeuchtebedingungen reagieren, wie z. B. die Landwirtschaft (WILLEKE et al. 1994). ALLEY (1984) identifizierte drei positive Eigenschaften des Palmer Index, die zu seiner Popularität beitragen:

- liefert Entscheidungsträgern eine Messgröße der Abweichung des gegenwärtigen Wetters einer Region
- bietet die Möglichkeit, die gegenwärtigen Bedingungen aus einer historischen Perspektive zu betrachten
- liefert räumliche und zeitliche Darstellung historischer Dürren

Außerhalb der USA fand der Palmer-Index lange Zeit nur geringe Akzeptanz (z. B. KOGAN 1995a). Ein Grund liegt darin, dass er nicht für gebirgige Regionen oder solche mit Extremen in der Variabilität des Regens oder Abflusses geeignet ist (SMITH et al. 1993). Eine weitere Einschränkung des PDSI liegt in der Modellannahme, dass Parameter wie Landnutzung/Landbedeckung und Bodeneigenschaften über die gesamte Klimazone hinweg einheitlich sind (NARASIMHAN & SRINIVASAN 2005). Verschiedene Studien haben auf eine ganze Reihe weiterer Schwächen bzw. Einschränkungen bei der Verwendung des Palmer Index hingewiesen (z. B. (AKIN-REMI et al. 1996; ALLEY 1984; GUTTMAN 1998; KARL & KNIGHT 1985; NARASIMHAN 2004; SOULE 1992; WEBER & NKEMDIRIM 1998; VICENTE-SERRANO et al. 2011):

- Die **empirische Natur des Index**. So basieren die Werte, welche die Intensität einer Dürre quantifizieren und Beginn und Ende einer Dürre oder einer Nassperiode anzeigen, auf Palmers Studien in Zentral-Iowa und West-Kansas. Sie sind willkürlich gewählt und haben eine geringe wissenschaftliche Bedeutung. Dadurch treten die Klassifikationen von „extremer“ und „schwerwiegender“ Dürre in einigen Teilen des Landes häufiger auf als in anderen (WILLEKE et al. 1994). In den *Great Plains* treten extreme Dürren nach dem PDSI mit einer Häufigkeit von mehr als 10 % auf, was nicht mehr wirklich als extrem zu betrachten ist. Dies führt zu Einschränkungen in der Vergleichbarkeit der Dürreintensität zwischen Regionen und erschwert die Planung von Reaktionsmaßnahmen basierend auf einer bestimmten Dürre-Intensität.
- **Vereinfachende Annahmen** des Index/Modells: Die zwei Bodenschichten innerhalb der Wasserbilanzgleichungen sind simplifiziert und müssen nicht repräsentativ für die gesamte Region sein. Zudem enthält der Index keinen Schnellfall, keine Schneedecke und gefrorenen Boden. Zudem werden keine Einflüsse aus der Landnutzung/-bedeckung auf den Wasserhaushalt einbezogen. Der gesamte Niederschlag wird als Regen behandelt, sodass das Timing der PDSI- oder PHDI-Werte in den Winter- oder Frühlingsmonaten in Gebie-

ten mit Schneevorkommen ungenau sein kann. Die natürliche Verzögerung zwischen dem Niederschlag und den resultierenden Abflüssen wird nicht mit in Betracht gezogen. Außerdem wird im Modell kein Abfluss zugelassen, bis nicht die Wasserkapazität der Oberfläche und der unterirdischen Bodenschichten gefüllt ist, was zu einer Unterschätzung des Abflusses führt.

- **Berechnungsansatz** zur Potenziellen Evapotranspiration **ETP**: Die ETP wird durch die Thornthwaite-Methode geschätzt. Diese Technik der Schätzung der ETP über die empirische Beziehung zwischen Evapotranspiration und Temperatur (THORNTHWAITE 1948) wird allgemein akzeptiert, ist aber trotzdem nur eine Annäherung. JENSEN et al. (1990) bewertete verschiedene Methoden der ETP-Schätzung unter verschiedenen klimatischen Bedingungen und schlussfolgerte, dass die Thornthwaite-Gleichung diejenige mit der schlechtesten Leistungsfähigkeit ist. Schon PALMER (1965) schlug vor, die Thornthwaite-Gleichung mit einer geeigneteren Methode zu ersetzen. Zur Schätzung der ETP wird eine physikalisch basierte Methode, wie die FAO Penman-Monteith-Gleichung (ALLEN et al. 1998), vorgeschlagen.
- Der Palmer Index ist sensitiv gegenüber dem aktuellen Wassergehalt (AWC) eines Bodentyps.
- Eine weitere Besonderheit des Palmer-Index ist der verwendete **Rücksetzalgorithmus**, d. h. Werte, die zuvor für vergangene Monate berichtet wurden, können sich auf der Basis der für den aktuellen Monat neu berechneten Werte verändern. Daher ist die operationelle Verwendung des Index problematisch – man kann ja bis zu einem späteren Zeitpunkt nicht genau wissen, ob die Palmer-Index-Werte nun wirklich eine Trocken- bzw. Nassperiode anzeigen (HEDDINGHAUS & SABOL 1991).

Erfolgt die Berechnung nahezu in Echtzeit, so ist Palmer's Index nicht länger als meteorologischer Index zu betrachten, sondern wird zum hydrologischen Index, weil er auf dem Zufluss von Feuchtigkeit (Niederschlag), dem Ausfluss und der Speicherung beruht und keine Landzeittrends in Betracht zieht (KARL & KNIGHT 1985). Er wird dann als *Palmer Hydrological Drought Index* (PHDI) bezeichnet (siehe Abschnitt 3.6).

Die verschiedenen Palmer Indizes benötigen für ihre Berechnung Informationen zur Feldkapazität (WEBB et al. 1993), welche global in einer räumlichen Auflösung von 1° von <http://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Webb.html> bezogen werden können.

Verbesserungen des PDSI: Verschiedene Autoren verwendeten anstelle der umstrittenen Thornthwaite-Methode andere Ansätze zur Abschätzung der potenziellen Evapotranspiration. Dazu gehört beispielsweise die Nutzung der Penman-Monteith-Gleichung (z. B. BURKE et al. 2006) oder der Priestley-Taylor-Formel (z. B. MAVROMATIS 2007).

Anlage 1-23: Selbstkalibrierender PDSI (Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index sc-PDSI)

Eines der Hauptprobleme der Palmer-Indizes ist, dass die für ihre Berechnung notwendigen Parameter empirisch bestimmt und hauptsächlich in den Vereinigten Staaten getestet wurden. Das begrenzt ihre Verwendbarkeit in anderen Regionen ein (AKINREMI et al. 1996) und schränkt den geografischen Vergleich basierend auf dem PDSI ein (HEIM 2002; GUTTMAN et al. 1992). Dieses Problem wurde durch die Entwicklung der selbstkalibrierten Palmer-Indizes (*self-calibrated Palmer indices*) gelöst (WELLS et al. 2004). Der scPDSI ist eine Variante des originalen PDSI von PALMER (1965), die das Ziel verfolgt, die für verschiedene Klimaregime erzielten Ergebnisse vergleichbarer zu machen (WELLS et al. 2004). Er wird aus Zeitreihen des Niederschlags und der Temperatur, zusammen mit einer Reihe von kalibrierten empirischen Konstanten berechnet. Für die Berechnung des scPDSI werden in der Berechnungsprozedur alle empirischen Konstanten Palmer's ersetzt, was den Berechnungsaufwand gegenüber der ursprünglichen Variante deutlich erhöht.

Die Berechnung enthält folgende Schritte:

- 1) Berechnung aller Feuchtigkeitsabweichungen
- 2) Berechnung aller Feuchtigkeitsanomalien
- 3) Berechnung der Dauereffekte unter Nutzung der in Schritt 2 berechneten Feuchteanomalien
- 4) Berechnung des PDSI unter Nutzung der Ergebnisse aus Schritt 2 und 3
- 5) Bestimmung des 98. und 2. Perzents des PDSI
- 6) Neuberechnung der Feuchteanomalien
- 7) Berechnung des sc-PDSI

Dieses Vorgehen führt dazu, dass einige Schwächen des bisherigen PDSI beseitigt werden:

- Der Wertebereich des PDSI liegt nun nahe an dem erwarteten Bereich von -5 bis +5, wobei Werte unterhalb -4 sowie oberhalb von +4 extreme Werte repräsentieren.
 - Die Sensitivität des Index ist nun an das lokale Klima gekoppelt.
 - Die Sensitivität gegenüber Feuchtigkeit und dem Fehlen von Feuchtigkeit ist unterschiedlich.
 - Der PDSI kann in unterschiedlichen Zeitintervallen aktualisiert werden (z. B. [zwei]wöchentlich, monatlich)
- VAN DER SCHRIER et al. (2007) publizierten einen selbstkalibrierenden PDSI mit Schneemodul.

Anlage 1-24: Wasserbilanzindex mit zwei Speichern (*Water Balance Index with Two Reservoirs*)

Dieser Index basiert auf einer vereinfachten, operationalen Wasserbilanz mit zwei Speichern und einer festgesetzten Bodentiefe (SIVAKUMAR et al. 2011). Der Index wird auf standardisierte Schwingelgrasvegetation angewandt. Die Variabilität der Bodenverhältnisse wird über die Betrachtung von vier Bodentypen einbezogen, welche sich auf die Bodenfeuchtespeicherkapazität von 50, 100, 150 und 200 mm beziehen. Abbildung 33 illustriert die Komponenten und den Aufbau des Modells. Eingangsgrößen des Modells sind die täglichen Niederschlagsmengen und die tägliche Evapotranspiration nach Penman-Monteith. Modelloutput sind das verbleibende Wasser und der Abfluss. Das Hauptziel dieses Werkzeuges ist es, seine synthetische Sicht auf die Wasserbilanz zu erhalten, ohne die Interaktionen von Boden oder Nutzpflanzen. Damit begründet sich auch seine hauptsächliche Limitation – nämlich, dass keine Interaktion von Nutzpflanzen- oder Bodentypen erfolgen. Zudem ist es nicht einfach, die durch das Modell für einen Punkt (Station) erhaltenen Informationen in die Fläche zu bringen.

Die Bewertung von Dürre erfolgt dann durch den Vergleich des modellierten Wassergehaltes mit verschiedenen statistischen Schwellenwerten (perzentilbasiert). So wird der tägliche Bodenwassergehalt (*soil water content* SWC) betrachtet, welcher definiert ist als das Verhältnis von Bodenfeuchte zu Bodenfeuchtespeicherkapazität. In den Abbildungen (z. B. Abbildung 34) sind die Tageswerte durch Farben gekennzeichnet mit

- Rot: trockener als das 10. Perzentil,
- Orange: trockener als das 20. Perzentil,
- Gelb: trockener als das 50. Perzentil.

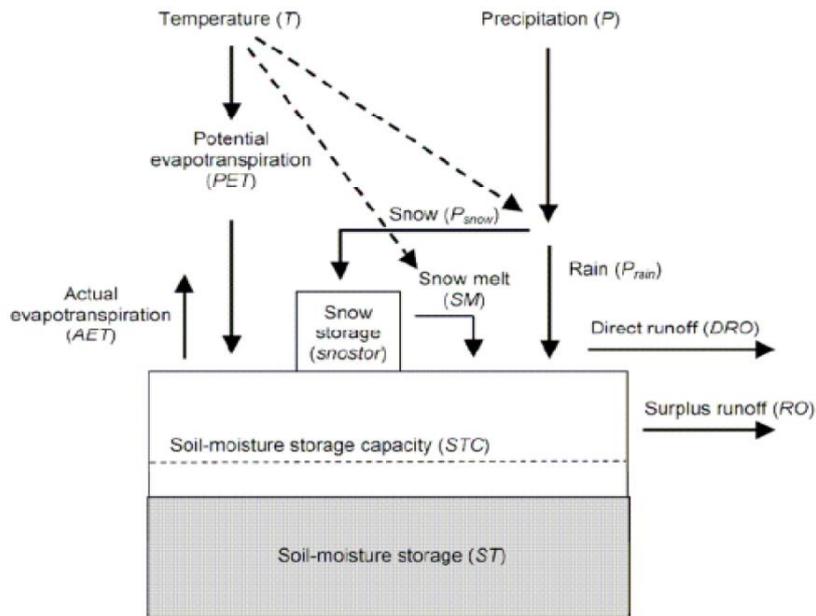


Abbildung 33: Prinzipieller Aufbau des Wasserbilanzmodells mit zwei Speichern (aus CLOPPET 2011)

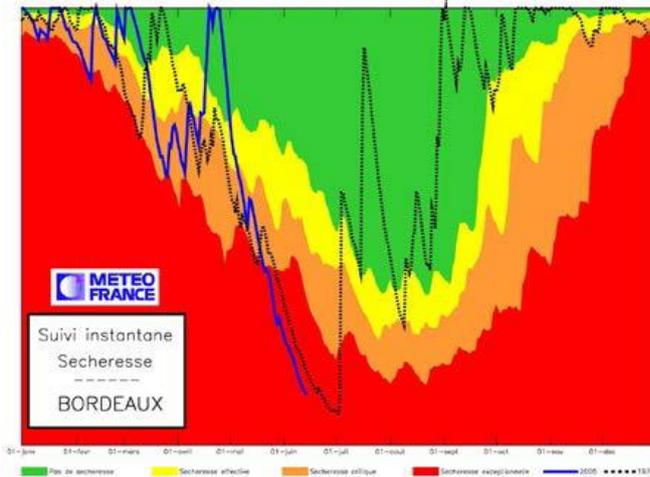


Abbildung 34: Charakterisierung des täglichen Wassergehaltes an der Station Bordeaux im Jahr 2005 (blaue Linie; Referenz trockenjahr 1976 als schwarze Linie abgebildet) (aus CLOPPET 2011)

Anlage 2: Beschreibung ausgewählter landwirtschaftlicher Dürreindizes

Anlage 2-1: ‚Getreidefeuchtigkeitsindex‘ (<i>Crop Moisture Index CMI</i>)	160
Anlage 2-2: Ertrags-Feuchtigkeits-Index (<i>Yield Moisture Index YMI</i>)	160
Anlage 2-3: ‚Ariditätsanomalienindex‘ (<i>Aridity Anomaly Index, AAI</i>).....	161
Anlage 2-4: Wasserbilanzindex (<i>Water Balance Index, auch FAO Water satisfaction index, WBI</i>).....	163
Anlage 2-5: Agro-Hydro Potential / Relative Evapotranspiration (AHP)	163
Anlage 2-6: Potentielles Evapotranspirationsdefizit (<i>Potential Evaporation Deficit PED</i>).....	164
Anlage 2-7: Relative-Bodenfeuchte-Index (<i>Relative Soil Moisture, RSM-index</i>)	165
Anlage 2-8: Bodenfeuchtedefizit-Index (<i>Soil Moisture Deficit Index, SMDI</i>)	165
Anlage 2-9: Evapotranspirationsdefizit-Index (<i>Evapotranspiration Deficit Index, ETDI</i>)	166
Anlage 2-10: Bodenwasserindex (<i>Soil Water Index, SWI</i>)	167

Anlage 2-1: ‚Getreidefeuchtigkeitsindex‘ (*Crop Moisture Index CMI*)

Der *Crop Moisture Index* wurde ebenfalls von PALMER (1968) aus Prozeduren der Berechnung des PDSI entwickelt. Während der PDSI aus Niederschlagsdefiziten berechnet wird, um langandauernde Dürren zu überwachen, wird der CMI aus Evapotranspirationsdefiziten berechnet, um kurzfristige landwirtschaftliche Dürrebedingungen zu überwachen, die das Getreidewachstum beeinflussen (NARASIMHAN & SRINIVASAN 2005). Dementsprechend spiegelt der CMI die kurzzeitige Feuchtigkeitsversorgung über die Hauptanbauggebiete für Getreide wider und ist aufgrund seiner schnellen Schwankungen nicht zur Bewertung von langanhaltenden Dürren gedacht. So kann beispielsweise ein Niederschlag während einer Dürreperiode dazu führen, dass die Feuchtebedingungen kurzfristig als ausreichend angesehen werden, wohingegen langfristig gesehen weiterhin Dürrebedingungen vorherrschen (HAYES 2000). Nach HEIM (2002) identifiziert der CMI landwirtschaftliche Dürren am effektivsten während der warmen Jahreszeit (sprich der Wachstumssaison).

Der CMI basiert auf der Mitteltemperatur und der Niederschlagssumme jeder Woche innerhalb eines Klimabereichs sowie den CMI-Werten der vorangegangenen Woche. Der CMI reagiert sehr rasch auf sich ändernde Bedingungen und wird nach den Standorten und der Zeit gewichtet (HAYES 2000). Eine wesentliche Einschränkung des CMI ist, dass er jede Wachstumssaison nahe Null beginnt und endet. Damit ist er nicht für Monitoring der Feuchtebedingungen außerhalb der allgemeinen Wachstumsperiode geeignet, z. B. wenn die Saatkeimung einsetzt (v. a. wenn sich Dürreperioden über mehrere Jahre hinziehen; HAYES 2000).

Sensitivitätsanalysen des CMI zeigten, dass ein Anstieg in der potenziellen Evapotranspiration zu einem Anstieg der CMI-Werte führen kann, was feuchtere Bedingungen anzeigt. Diese unplausible Reaktion des CMI auf Veränderungen in der Temperatur ist auf die Abhängigkeit des annormalen Evapotranspirationstermes von der Größe der potenziellen Evapotranspiration (MISHRA & SINGH 2010).

Anlage 2-2: Ertrags-Feuchtigkeits-Index (*Yield Moisture Index YMI*)

Der auf gewichteten monatlichen kumulativen Niederschlagssummen basierende Ertrags-Feuchtigkeitsindex (YMI, CEAS 1979; ACHUTUNI et al. 1982, SAKAMOTO et al. 1984) wird v.a. auf den Philippinen verwendet (<http://www.pagasa.dost.gov.ph/climate-agromet/climate-impact-assessment/impact-assessment-for-agriculture>). Die monatlichen Gewichte sind eine Funktion der Pflanzenwasserbedürfnisse, welche von Wachstumsphase zu Wachstumsphase variieren. Der YMI ist ein einfacher Index, der den Nutzer bei der Bewertung der agrarklimatologischen Getreidebedingungen während der Anbauzeit unterstützt. Für ein bestimmtes Getreide ist er folgendermaßen definiert:

$$YMI = \sum_i^n P_i K_i$$

Dabei ist i das Entwicklungsstadium des Getreides (1 = Anpflanzen/Verpflanzen, 2 = vegetative Phase, 3 = Blüte und Reproduktionsphase, 4 = Reifestadium, 5 = Ernte), n die Gesamtzahl der Entwicklungsstadien, P_i der Niederschlag während des i -ten Entwicklungsstadiums und K_i der entsprechende Getreidekoeffizient für das i -te Entwicklungsstadium.

Die Verwendung des YMI in quantitativer Form ist für die Bewertung von Dürren wenig hilfreich. Stattdessen wird auf den Perzentilrang des YMI geschaut (Tabelle 29). Diese Bewertung kann auch an die lokalen Gegebenheiten angepasst werden.

Tabelle 29: Bewertung des Perzentilrangs des YMI (<http://www.pagasa.dost.gov.ph/climate-agromet/climate-impact-assessment/impact-assessment-for-agriculture>)

Perzentil-Rang	Interpretation
> 80	Potenzial für Flutschäden
41 – 80	Getreidebedingungen sind nahe normal bis über dem Normalen
21 – 40	Moderate Dürreauswirkungen mit reduziertem Ertrag
11 – 20	Dürreauswirkungen mit schwerwiegenden Ernteverlusten
< 10	Schwere Dürreauswirkungen mit Missernten und potenziellem Nahrungsmangel

Die Getreidekoeffizienten für die fünf Entwicklungsphasen sind beispielhaft in Tabelle 30 aufgeführt. Der Nutzer kann die Koeffizienten für ein spezifisches Getreide und Ort auch entsprechend der Vorgaben in DOORENBOS & PRUITT (1977) berechnen. Soll der Index in einer spezifischen Region angewandt werden, so muss er hinsichtlich seiner Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit getestet werden.

Tabelle 30: Getreidekoeffizienten für ausgewählte Getreidearten nach DOORENBOS & PRUITT (1977)

Getreide	Wachstumsphase des Getreides				
	Anpflanzen/ Verpflanzen	vegetative Phase	Blüte und Reproduktionsphase	Reifestadium	Ernte
Weizen	0,30 – 0,40	0,70 – 0,80	1,05 – 1,20	0,65 – 0,75	0,20 – 0,25
Mais	0,30 – 0,50	0,70 – 0,90	1,05 – 1,20	1,00 – 1,15	0,95 – 1,10
Mais	0,30 – 0,50	0,70 – 0,85	1,05 – 1,20	0,80 – 0,95	0,55 – 0,60
Kartoffeln	0,40 – 0,50	0,70 – 0,80	1,05 – 1,20	0,85 – 0,95	0,70 – 0,75
Erbsen	0,40 – 0,50	0,70 – 0,85	1,05 – 1,20	1,00 – 1,15	0,95 – 1,10
Hirse	0,30 – 0,40	0,70 – 0,75	1,00 – 1,15	0,75 – 0,80	0,50 – 0,55

Anlage 2-3: ‚Ariditätsanomalienindex‘ (Aridity Anomaly Index, AAI)

Der Ariditätsanomalienindex ist ein Werkzeug zur Überwachung von landwirtschaftlichen Dürren (SIVAKUMAR et al. 2011). Er wird v. a. in Indien angewendet (RAO et al. 1981; GEORGE & RAMASTRY 1975; SARKAR 2011). Dort wird er zeitnah wöchentlich bzw. zwischen den beiden Hauptanbauphasen alle zwei Wochen berechnet und verschiedenen Nutzern zur Verfügung gestellt. Wenn die Anomalien für ein großes Netzwerk an Stationen für verschiedene Wochen berechnet, analysiert und grafisch dargestellt wurden, können die Gebiete identifiziert werden, wo das Getreide unter Feuchtigkeitsstress leiden könnte. Die entsprechenden Karten werden auf der Internetseite des indischen meteorologischen Dienstes bereitgestellt (z. B. Abbildung 35).

Die Berechnung der Ariditätsanomalien basiert im Allgemeinen auf der Wasserhaushaltsbilanzierung nach THORNTHWAITE (1948). Demnach wird der Regen von den Pflanzen zunächst für die Evapotranspiration verwendet und überschüssiges Wasser dringt in den Boden ein und füllt die Bodenwasserspeicher auf, bis dieser die Feldkapazität erreicht. Weiterhin überschüssiges Wasser fließt oberflächlich oder unterirdisch ab. Ist der Niederschlag geringer als der Evapotranspirationsbedarf, entzieht die Pflanze dem Boden Feuchtigkeit bis dieser ausgetrocknet ist (SARKAR 2011).

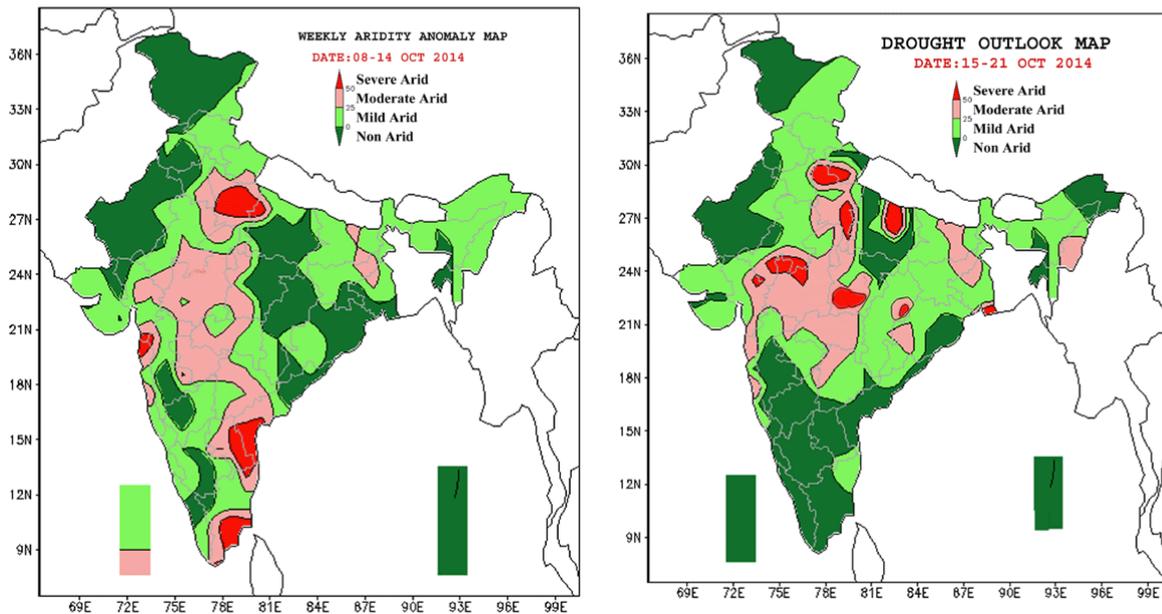


Abbildung 35: Karte des Ariditätsanomalienindex in Indien für den 08.–14.10.2014 (links) und Ausblick über die für die Woche vom 15.–21.10.2014 (rechts) erwarteten Dürreintensitäten (<http://www.imdpune.gov.in/research/drought/drought.html#map>)

Zur Berechnung des AAI wird zunächst der Ariditätsindex AI , ermittelt (SARKAR 2011):

$$AI = \frac{ETP - AET}{ETP} \times 100$$

Dabei ist ETP die potenzielle Evapotranspiration, die den Wasserbedarf der Pflanzen angibt, und AET die aktuelle Evapotranspiration. AET wird über Wasserhaushaltsberechnungen unter Einbeziehung der Wasserhaltekapazität des Bodens vor Ort ermittelt. Die Differenz aus ETP und AET gibt die Größe des Wasserdefizits an. Der Ariditätsindex wird wöchentlich/zweiwöchentlich berechnet und gibt den Grad des Wasserstress für eine Pflanze im Wachstum an, den diese aufgrund des Mangels von verfügbarer Feuchtigkeit (Niederschlag und Bodenfeuchte) erfährt. Die Ariditätsanomalien AAI erhält man, indem man den aktuell ermittelten Ariditätsindex AI dem klimatologischen Mittelwert \overline{AI} gegenüberstellt:

$$AAI = \frac{AI - \overline{AI}}{\overline{AI}} \times 100$$

Nimmt der AAI negative Werte an, so erfährt der Ort im Vergleich zu den Normalbedingungen weniger aride Bedingungen. Positive AAI-Werte zeigen das Auftreten von Dürren im Vergleich zu den normal beobachteten Ariditätswerten an. Diese lassen sich in drei Klassen einteilen (Tabelle 31):

Tabelle 31: Klassifizierung des AAI (SARKAR 2011)

Index-Wert	Dürrezustandsbeschreibung
1 – 25	Milde Dürre
26 – 50	Moderate Dürre
> 50	Schwerwiegende Dürre

Anlage 2-4: Wasserbilanzindex (Water Balance Index, auch FAO Water satisfaction index, WBI)

FRERE & POPOV (1979) haben einen Index entwickelt, der auf dekadischen (10-Tages)-Wetterdaten basiert und den Grad widerspiegelt, zu dem die Wasserbedürfnisse einjähriger Nutzpflanzen während der Wachstumsperiode erfüllt werden. Die Methode wurde im Wesentlichen für die Verwendung in Entwicklungsländern mit regenwassergespeister Landwirtschaft entwickelt (SAKAMOTO et al. 1984).

Der Index sollte für seine Anwendung in einer spezifischen Region hinsichtlich seines Informationsgehaltes und somit seiner Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit getestet werden. Hinsichtlich der spezifischen Anwendungen und Bedingungen sollte der interessierte Anwender den Bericht von FRERE & POPOV (1979) konsultieren.

Wie der Ertragsfeuchte-Index YMI verwendet auch der WBI die Pflanzenkoeffizienten nach DOORENBOS & PRUITT (1977). Aus der Multiplikation dieses Koeffizienten mit der potenziellen Verdunstung (bestimmt z. B. nach FAO Penman, Thornthwaite, Hargreaves), ergibt sich der Wasserbedarf WR, der zu den in einer Dekade erhaltenen Niederschlägen in Bezug gesetzt wird. Neben Klimafaktoren und Pflanzeigenschaften werden auch Bodeninformationen (Wasserreserve im Boden R_s und Bodenwasserspeicherkapazität SRC) in die Indexberechnung einbezogen. Wenn möglich, sollten die Werte für die Bodenwasserspeicherkapazität aus Experimenten abgeleitet werden (FRERE & POPOV 1979).

Anlage 2-5: Agro-Hydro Potential/Relative Evapotranspiration (AHP)

Dieser Index zeigt an, zu welchem Grad und wie lange ein bestimmtes Gebiet den Wasserbedarf gegebener Pflanzen decken kann (PETRASOVITS 1990). Das AHP berechnet sich nach der aktuellen Evapotranspiration des Getreides, geteilt durch dessen optimale (bzw. potenzielle) Evapotranspiration:

$$AHP = ET_{\text{actual}}/ET_{\text{optimal}}$$

Per Definition variiert das AHP zwischen 0 und 1. Die berechneten Werte werden je nach Größe in vier verschiedene Kategorien eingeteilt (Tabelle 32). BOS et al. (2005) geben an, dass das AHP während des Jahres nicht unter 0,7 fallen sollte. BASTIAANSEN et al. (2001) verwendeten einen ‚operationellen Bereich‘ (AHP = 0,8 bis 1,0) und einen ‚akzeptablen Bereich‘ (AHP = 0,7 bis 1,0) für diesen Index. Innerhalb des operationellen Bereichs wird die Getreideernte um weniger als 10 % vom Zielwert abweichen. Wenn der Index den akzeptablen Bereich verlässt, dann muss mit Ernteeinbußen von mehr als 20 % gerechnet werden. Als Maß für die Schwere der Dürre kann die Zahl der Tage mit Wasserstress (AHP < 0,5) ermittelt werden.

Der Index wird häufig für die Planung der landwirtschaftlichen Bewässerung verwendet (z. B. BASTIAANSEN et al. 2001). Die Begrifflichkeiten und der Zeitpunkt, wo Bewässerungsmaßnahmen ergriffen werden, sind in Abbildung 36 illustriert.

Tabelle 32: Kategorien des Agro-Hydro Potential (AHP)

AHP-Bereich	Erläuterung
1,0 – 0,8	Wasserknappheit des Pflanzenstandortes besteht nur theoretisch, weil die Wasserlieferung zu den Pflanzen fortdauernd und nahezu unbegrenzt ist
0,8 – 0,5	Vermögen des Standortes, den Wasserbedarf zu decken, hält immer noch an, wird aber immer mehr eingeschränkt
0,5 – 0,3	Hohe Wasserknappheit und periodische Limitierung der Wasserlieferung an die Pflanzen führt zur Entstehung von Wasserstress
< 0,3	Starker Wasserstress verursacht beträchtliche Biomasse- und Ertragsdefizite und führt bei längerer Dauer zum Tod der Pflanzen

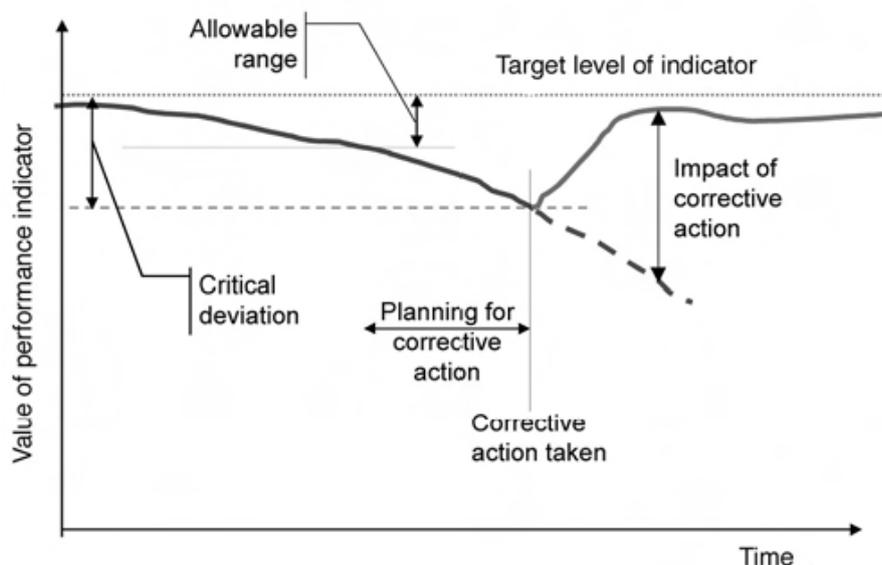


Abbildung 36: Darstellung der Terminologie des dimensionslosen Performanceindizes (BASTIAANSEN et al. 2001)

Für die Bestimmung der potenziellen und aktuellen Evapotranspiration werden Satellitendaten verwendet (z. B. BASTIAANSEN et al. 2001) oder hydrologische Modelle eingesetzt (z. B. SWAT-Modell in GOSAIN et al. 2010). Dafür können frei im Internet verfügbare Satellitendaten verwendet werden.

Anlage 2-6: Potenzielles Evapotranspirationsdefizit (Potential Evaporation Deficit PED)

Der von PORTEOUS et al. (2005) entwickelte Index Potenzielles Evapotranspirationsdefizit wird in Neuseeland für die Bewertung der Feuchtigkeitsbedingungen von Weiden angewendet. Das Potenzielle Evapotranspirationsdefizit bezeichnet die Lücke zwischen den Wasserbedarf und der aktuell verfügbaren Feuchtigkeit. Von der Vorstellung her entspricht dies der Wassermenge, die durch Niederschlag oder Bewässerung zugeführt werden müsste, damit eine Weide entsprechend ihrer potenziellen jahreszeitlichen Wachstumsrate wächst.

Das potenzielle Evapotranspirationsdefizit PED wird berechnet, indem zunächst für jeden Monat die aktuelle Evapotranspiration AET aus der Differenz zwischen potenzieller Evapotranspiration ETP und Niederschlag P geschätzt wird:

$$AET = f (ETP - P), \text{ wobei } AET = ETP \text{ für } (ETP \leq P) \text{ und } AET = ETP - P \text{ für } (ETP > P)$$

Niederschlag, der die Feldkapazität übertrifft, geht als Abfluss oder Drainage verloren.

Der Index PED wird dann auf monatlicher Basis akkumuliert:

$$PED_n = \sum PED_{n-1} + (ETP_n - AET_n)$$

Tage des potenziellen Evapotranspirationsdefizits bezeichnen Tage, an denen der Wasserbedarf nicht erfüllt und somit das Weidewachstum reduziert wird. Annähernd entspricht dabei eine Akkumulation von mehr als 30 mm PED einer Extrawoche reduzierten Graswachstums⁷. PED ist eine nützliche Methode, um die Schwere von Trockenperioden aus meteorologischer Sichtweise zu bewerten. PED kann auch aus einem Wasserbilanzmodell für den Oberboden abgeleitet werden (COULTER 1973; PORTEOUS et al. 1994).

Anlage 2-7: Relativer-Bodenfeuchte-Index (*Relative Soil Moisture, RSM-index*)

Die relative Bodenfeuchte (*Relative Soil Moisture RSM*), die Bodenfeuchte (*Soil Moisture SM*) oder die Bodenwasserspeicherung (*Soil Water Storage SWS*) sind Outputgrößen der Wasserbilanz. Sie können durch unterschiedliche Wasserbilanzmethoden ermittelt werden, wie die von THORNTHWAITE & MATHER (1955), MOLINAS & ANDRADE (1993), ALLEN et al. (1998), RITCHIE (1998) und GEVAERD & FREITAS (2006) vorgeschlagenen. Jede Wasserbilanzmethode benötigt spezifische Eingaben, doch im Wesentlichen benötigen sie Klima- (Niederschlag und potenzielle Evapotranspiration), Boden- (physikalische Eigenschaften) und Pflanzeninformationen (Getreidetyp, Blattfläche, Pflanzensensitivität gegenüber Wasserstress, Wasserbedarf für jede phänologische Phase). Indizes der relativen Bodenfeuchte sind sehr sensitiv gegenüber der Getreideart und dem Pflanzenmanagement während der verschiedenen Wachstumsphasen.

Weltweit werden verschiedene Indizes zur Beschreibung der relativen Bodenfeuchte verwendet. Dazu gehört der Relative-Bodenfeuchte-Index (RSM-Index). Er berechnet sich aus der Beziehung zwischen der Bodenwasserspeicherung (*Soil Water Storage SWS*) und der Bodenwasserspeicherfähigkeit (*Soil Water Holding Capacity SWHC*; SIVAKUMAR et al. 2011).

$$RSM_a = \frac{SWS}{SWHC} \times 100\%$$

Vom Chinesischen meteorologischen Dienst (*Chinese Meteorological Administration CMA*) wird die relative Bodenfeuchte RSM_b definiert als Verhältnis zwischen der Bodenfeuchte in Prozent SM und der Feldkapazität des Bodens FC (SIVAKUMAR et al. 2011).

$$RSM_b = \frac{SM}{FC} \times 100\%$$

Anlage 2-8: Bodenfeuchtedefizit-Index (*Soil Moisture Deficit Index, SMDI*)

Der Bodenfeuchtedefizit-Index SMDI wurde von NARASIMHAN & SRINIVASAN 2005 mit der Absicht entworfen, einen Dürreindex mit großer räumlicher (4 km) und zeitlicher (täglich bis wöchentlich) Auflösung zu generieren, der die kurzzeitigen Dürrebedingungen, wie sie für lokale landwirtschaftliche Anwendungen relevant sind, abbilden kann. Der von ihnen vorgeschlagene Index wird aus der wöchentlichen Bodenfeuchte, die durch eine Langzeitstatistik normalisiert wurde, erzeugt.

NARASIMHAN & SRINIVASAN 2005 verwendeten das hydrologische Modell SWAT (ARNOLD et al. 1998; NEITSCH et al. 2002) zur Berechnung der Bodenfeuchte. Als Pflanzenwachstumsmodell in SWAT nutzten sie eine vereinfachte Version des EPIC-Getreidemodells (WILLIAMS et al. 1984). Das Bodenfeuchtedefizit SD [in %] wird

⁷ <https://www.niwa.co.nz/climate/nzcu/climate-update-73-july-2005/backgrounder>

für jedes Jahr i und jede Woche j bestimmt aus dem modellierten wöchentlichen gemittelten verfügbaren Bodenwasser in der Wurzelzone SW :

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{MSW_j - \min SW_j} \times 100, \text{ falls } SW_{i,j} < MSW_j$$

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{\max SW_j - MSW_j} \times 100, \quad \text{falls } SW_{i,j} > MSW_j \quad \text{mit}$$

$SW_{i,j}$: Modelloutput des verfügbaren Bodenwassers in der Wurzelzone über eine 7-tägige Periode gemittelt für jede der $j = 1-52$ Wochen

MSW_j : aus dem Median der wöchentlichen Bodenwasserwerte ermittelte Langzeitbodenfeuchte (in der Studie von NARASIMHAN & SRINIVASAN (2005) für 1911–1980)

$\min SW_j$: Langzeitminimum der wöchentlichen Bodenwassermittelwerte

$\max SW_j$: Langzeitmaximum der wöchentlichen Bodenwassermittelwerte

Die SD-Werte reichen von -100 (sehr trocken) bis +100 (sehr nass) und sind für verschiedene Gebiete miteinander vergleichbar. Sie geben die Trockenheit (Nassheit) während dieser Woche an. Eine Dürre liegt dann vor, wenn die Trockenheit für eine ausgedehnte Zeitdauer anhält, die das Getreidewachstum beeinträchtigen kann. Dazu wird die Zeitdauer bestimmt, über welche die Trockenheitswerte akkumuliert werden sollen, um die Dürreschwere zu bestimmen. Die Dürreschwere einer jeden Woche j ergibt sich aus:

$$SMDI_j = 0,5 \cdot \left(SMDI_{j-1} + \frac{SD_j}{50} \right)$$

Dabei verfolgen die Autoren das Ziel vergleichbare Dürrekategorien wie der PDSI zu erhalten (-4 für extreme Dürre; im vorliegenden Fall für $\max SW_j$). Der SDMI kann für verschiedene Bodentiefen berechnet werden, um die unterschiedlichen Wurzeltiefen verschiedener Getreidearten und die unterschiedlichen Phasen der Pflanzenentwicklung einbeziehen zu können. NARASIMHAN & SRINIVASAN (2005) verwendeten zusätzlich zur gesamten Bodensäule (SMDI) die oberen 2, 4 und 6 ft. (SMDI-2, SMDI-4, SMDI-6).

Im Vergleich zum PDSI und SPI zeigen der SMDI und der verwandte ETDI im Allgemeinen hohe Korrelationen, was zeigt, dass sie Dürreereignisse gut identifizieren können. SMDI und ETDI für die geringeren Bodentiefen sind dabei besser zu den kurzzeitigen SPI (1-3 Monate) korreliert, während der SMDI für tiefere Bodenschichten besser mit dem langsamer reagierenden PDSI sowie dem SPI für 6-12 Monate übereinstimmt.

Anlage 2-9: Evapotranspirationsdefizit-Index (Evapotranspiration Deficit Index, ETDI)

NARASIMHAN & SRINIVASAN (2005) verwendeten die gleiche Vorgehensweise wie beim Bodenfeuchtedefizit-Index (SMDI) zur Bestimmung des Evapotranspirationsdefizitindex (ETDI). Dazu verwendeten sie das wöchentlich aus Getreidereferenzverdunstung ETP und aktueller Evapotranspiration AET ermittelte Wasserstressverhältnis WS :

$$WS = (ETP - AET) / PET$$

Die Indizes SMDI und ETDI sind in den untersuchten Gebieten positiv mit dem SPI (auf verschiedenen Zeitskalen) und dem PSDI korreliert (NARASIMHAN & SRINIVASAN 2005). Dies legt nahe, dass die durch den SMDI und den ETDI identifizierten Trocken- und Nassperioden in guter Übereinstimmung mit dem PDSI und dem SPI sind. Die größten Korrelationen wurden für den ETDI und den SMDI-2 mit dem SPI-1-Monat ($r \sim 0.7$) festgestellt, was nahelegt, dass die beiden von NARASIMHAN & SRINIVASAN (2005) entwickelten Indizes für das Monitoring landwirtschaftlicher Dürren geeignet sind. Dies wurde durch Korrelationsanalysen der Indikatoren

zu den Erträgen von Weizen und Hirse bestätigt; hier zeigten sich hohe Korrelationen ($r > 0.75$) während der Wochen der kritischen Wachstumsphasen.

Anlage 2-10: Bodenwasserindex (Soil Water Index, SWI)

Der Bodenwasserindex berechnet die Menge von in der Wurzelzone gespeichertem Bodenwasser SW_i als Prozentsatz der Wasserhaltekapazität (WHC) des Bodens am Ende eines bestimmten Tages i:

$$SWI = SW_i / WHC \times 100 \%$$

Der Bodenwassergehalt SW_i wird dabei durch eine einfache Massenbilanzgleichung ermittelt aus dem Wert des Vortages sowie des Niederschlags P und der aktuellen Evapotranspiration AET:

$$SW_i = SW_{i-1} + P_i - AET$$

Die Größen AET und SW werden durch ein Modell ermittelt. CLOPPET (2011) nutzte dafür das hydrometeorologische Modell SAFRAN ISBA MODCOU und SENAY (2009) das Modell VegET (SENAY 2008).

Der Index eignet sich für auf Bodenfeuchtebedingungen basierende Planungen (z. B. zusätzliche Bewässerung). Er liefert jedoch keine Informationen zum über die Jahreszeit integrierten Zustand der Nutzpflanzen, sondern zum aktuellen, akuten Feuchtigkeitsdefizit.

Der Index wird in vier qualitative Kategorien eingeteilt:

- Bodenwasser-Index mit 90-100 % („ausreichend“) impliziert, dass genug Bodenwasser in der Wurzelzone vorhanden ist, um das Getreide die nächsten paar Tage (~7-10 d) zu versorgen, ohne dass diese in Wasserstress geraten
- Bodenwasserindex mit 50-90 % („befriedigend“) weist auf Bedingungen hin, die bei ausreichender Feuchteversorgung zur Vermeidung von Pflanzenstress bis zu leichtem Stress in den nächsten paar Tagen reichen
- Im „Stress-Bereich“ (10-50 %) ist es sehr wahrscheinlich, dass die Nutzpflanzen Wasserstress erfahren (moderat bis schwerwiegend), wenn es in den nächsten Tagen keinen Niederschlag gibt.
- In der „Welke-Gruppe“ (0-10 %) ist der Boden bereits bei so niedrigen Bodenfeuchtwerten, dass eine fortgesetzte Dürre zum Welken der Nutzpflanzen führt. Nach agrarischer Definition setzt das Welken ein, wenn der Bodenwassergehalt 0 % der Wasserrückhaltekapazität erreicht – daher wird die Pflanze nicht welken, wenn Niederschläge auftreten, bevor die Feuchtigkeit komplett aufgebraucht ist.

Anlage 3: Hydrologische Dürreindizes

Anlage 3-1: Oberflächenwasserversorgungs-Index (<i>Surface Water Supply Index</i> , SWSI).....	169
Anlage 3-2: ‚Rückgewinnungs-Dürre-Index‘ (<i>Reclamation Drought Index</i> , RDI)	169
Anlage 3-3: ‚Abflussdürre-Index‘ (<i>Streamflow Drought Index</i> , SDI).....	170

Anlage 3-1: Oberflächenwasserversorgungs-Index (Surface Water Supply Index, SWSI)

Dieser Index wurde in Colorado (SHAFER & DEZMAN 1982) mit der Intention entwickelt, den PDSI in Gebieten, wo nicht der Niederschlag die einzige bzw. Hauptwasserquelle ist, zu ersetzen. Er wurde durch verschiedene amerikanische Staaten (Oregon, Montana, Idaho und Utah) adaptiert, wo Schnee eine große Komponente der Wasserbilanz darstellt. SWSI integriert die Reservoir-Speicherung (resv), den Abfluss (strm) sowie die beiden Niederschlagsarten Regen (prec) und Schnee (snow) in großen Höhenlagen in einem Index. Die Berechnung erfolgt nach der Formel

$$SWSI = (a P_{snow} + b P_{prec} + c P_{strm} + d P_{resv} - 50)/12,$$

wobei a, b, c und d Gewichte für Schnee, Regen, Abfluss und Reservoir-Speicherung ($a + b + c + d = 1$) sowie P_i die Wahrscheinlichkeiten (%) der Nichtüberschreitung für jede dieser Wasserbilanzkomponenten darstellen.

Die Berechnungen werden mit einem monatlichen Zeitschritt unternommen. Die Subtraktion von 50 und die Division durch 12 sind die Normalisierungsprozeduren, damit die SWSI-Werte einen ähnlichen Bereich wie die PDSI-Werte (-4,2 bis +4,2) aufweisen. Der SWSI ist ein repräsentatives Maß der Wasserverfügbarkeit in Einzugsgebieten oder ausgewählten Regionen/Provinzen. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass er erfolgreich für große Regionen mit signifikanter räumlicher hydrologischer Variabilität eingesetzt werden kann, weil die Gewichte von einem Teil der Region zum anderen variieren können (z. B. DOESKEN et al. 1991).

Weil Niederschlagsdefizite erst mit einiger zeitlicher Verzögerung in ober- und unterirdischen Wasserquellen nachweisbar sind, tritt die hydrologische Dürre nicht in Phase mit landwirtschaftlicher Dürre auf. Daher ist der SWSI nicht für das landwirtschaftliche Dürremonitoring geeignet (NARASIMHAN & SRINIVASAN 2005).

Eine Modifikation des SWSI ist als Reklamations-Dürreindex (RDI) bekannt und wird in Oklahoma (USA) als Teil des Dürremanagementplans genutzt. Er wird ähnlich wie der SWSI berechnet, enthält aber auch eine temperaturbasierte Bedarfskomponente. Der Bereich und die Schwellen ähneln denen des PDSI und SWSI.

Anlage 3-2: ‚Rückgewinnungs-Dürre-Index‘ (Reclamation Drought Index, RDI)

Der Reklamations-Dürreindex (RDI) wurde als Werkzeug zur Definition der Schwere und Dauer von Dürre entwickelt und um das Einsetzen und den Endzeitpunkt von Dürren zu bestimmen (HAYES 2000). Entwickelt wurde er von der Reklamationsbehörde in Oklahoma als Auslöser für die Freigabe von Dürrehilfsgeldern (WEGHORST 1996). Wie der SWSI wird der RDI auf Einzugsgebiets-Ebene berechnet, Eingangsgrößen sind Temperatur, Niederschlag, Schneespeicherung, Abfluss und Reservoirspegel. Im Gegensatz zum SWSI werden jedoch eine temperaturbasierte Bedarfskomponente und eine Dauer in den Index eingebaut.

Tabelle 33: Klassifikation des RDI (HAYES 2000)

RDI Klassifikation	Beschreibung des Feuchtezustandes
$\geq 4,0$	extrem nass
1,5 bis 4,0	moderat nass
0 bis 1,5	normale bis milde Nässe
-1,5 bis 0	normale bis milde Dürre
-1,5 bis -4,0	moderate Dürre
$\leq -4,0$	extreme Dürre

Der RDI kann an jede Region individuell angepasst werden und er kann sowohl Klima- als auch Wasserdarbootsfaktoren erklären. Durch die Einbeziehung der Temperatur kann die Evapotranspiration erklärt werden. Die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Einzugsgebiete ist jedoch aufgrund der Einzigartigkeit des Indexes für

jedes Einzugsgebiet eingeschränkt. Die erhaltenen Indexwerte können in sechs Feuchteklassen eingeteilt werden (Tabelle 33).

Anlage 3-3: 'Abflussdürre-Index' (Streamflow Drought Index, SDI)

Wenn eine monatliche Zeitreihe der Abflussvolumen $Q_{i,j}$ verfügbar ist – mit i = hydrologisches Jahr und j = Monat im hydrologischen Jahr ($j = 1$ für Okt und $j = 12$ für Sep) – dann kann der kumulative Abfluss $V_{i,k}$ im i -ten hydrologischen Jahr und der k -ten Referenzperiode ($k = 1$ für Okt–Dez, $k = 2$ für Okt–Mär, $k = 3$ für Okt–Jun, $k = 4$ für Okt–Sep), bestimmt werden durch:

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j}$$

Basierend auf diesen kumulativen Abflussvolumen kann der Abflussdürreindex (Streamflow Drought Index) SDI i,k für jede Referenzperiode k und das i -te hydrologische Jahr berechnet werden als (TIGKAS et al. 2014):

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{\sigma_k}$$

Dabei sind \bar{V}_k der Mittelwert und σ_k die Standardabweichung der kumulativen Abflussvolumen der Referenzperiode k – berechnet über eine lange Zeitperiode. In dieser Definition wird das Abbruchkriterium auf \bar{V}_k gesetzt, es könnten jedoch auch andere rationale Kriterien genutzt werden (NALBANTIS 2008). Im Allgemeinen kann der Abfluss – für kleine Einzugsgebiete – einer schiefen Verteilung folgen, die durch eine Verteilung aus der Gamma-Familie angenähert werden kann (TIGKAS et al. 2014). Nach der Anpassung der Verteilung und der Umwandlung in eine Normalverteilung kann der SDI – entsprechend der SPI-Definition – auch definiert werden als (NALBANTIS 2008; NALBANTES & TSAKIRIS 2009):

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{\sigma_{y,k}} \quad \text{mit} \quad y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \text{ (oder andere Verteilung).}$$

Basierend auf dem SDI können die in Tabelle 34 dargestellte Dürreklassen definiert werden (NALBANTES & TSAKIRIS 2009), welche prinzipiell denen des SPI entsprechen.

Tabelle 34: Definition der Zustände hydrologischer Dürre mittels des SDI (NALBANTIS 2008)

Zustand	Beschreibung	Kriterium	Wahrscheinlichkeit
0	Keine Dürre	$SDI \geq 0,0$	50,0
1	Leichte Dürre	$-1,0 \leq SDI < 0,0$	34,1
2	Moderate Dürre	$-1,5 \leq SDI < -1,0$	9,2
3	Schwere Dürre	$-2,0 \leq SDI < -1,5$	4,4
4	Extreme Dürre	$SDI < -2,0$	2,3

Anlage 4: Kombinierte Dürreindizes

Anlage 4-1: US Dürremonitor (U.S. Drought Monitor, US DM).....	172
Anlage 4-2: Nordamerikanischer Dürremonitor (<i>North American Drought Monitor</i> , NADM).....	173
Anlage 4-3: Index der Vegetationsreaktion auf Dürre (<i>Vegetation Drought Response Index</i> , VegDRI)	174
Anlage 4-4: Kombiniertes Dürreindex des EDO (EDO's <i>Combined drought index</i> ,)	176

Anlage 4-1: US-Dürremonitor (U.S. Drought Monitor, US DM)

Zur Konsolidierung und Zentralisierung des Dürremonitorings in den Vereinigten Staaten entwickelten verschiedene Vertretungen der NOAA und des US-Landwirtschaftsministeriums (USDA) zusammen mit dem nationalen Dürremitigationszentrum (*National Drought Mitigation Center*) den wöchentlichen Dürremonitor (*Drought Monitor*), der Klimadaten und fachlichen Input von allen Ebenen einbezieht (SVOBODA 2000). Weil keine Einzeldefinition von Dürre unter allen Umständen funktioniert, stützt sich der DM auf die Analyse verschiedener Schlüsselindizes, um letztendlich eine Gesamtkarte zu erstellen. Diese Schlüsselparameter beinhalten den PDI, den CMI, den PNI, Perzentile aus dem Bodenfeuchtemodell, Perzentile täglicher Abflussmengen, die von der USDA generierte Oberbodenfeuchte und dem satellitenbasierten Vegetationsgesundheitsindex (*Vegetation Health Index VHI*). Zusätzlich werden auch der SWSI, der KBDI, der SPI, Schneedeckenverhältnisse, Talsperrenstände, Grundwasserstände von Grundwasserbrunnen, die vom USDA bereitgestellten Ernteberichte und direkte In-Situ-Bodenfeuchtemessungen einbezogen. Einige dieser Zusatzindizes sind nur zeitverzögert oder auf lokaler/regionaler Ebene verfügbar.

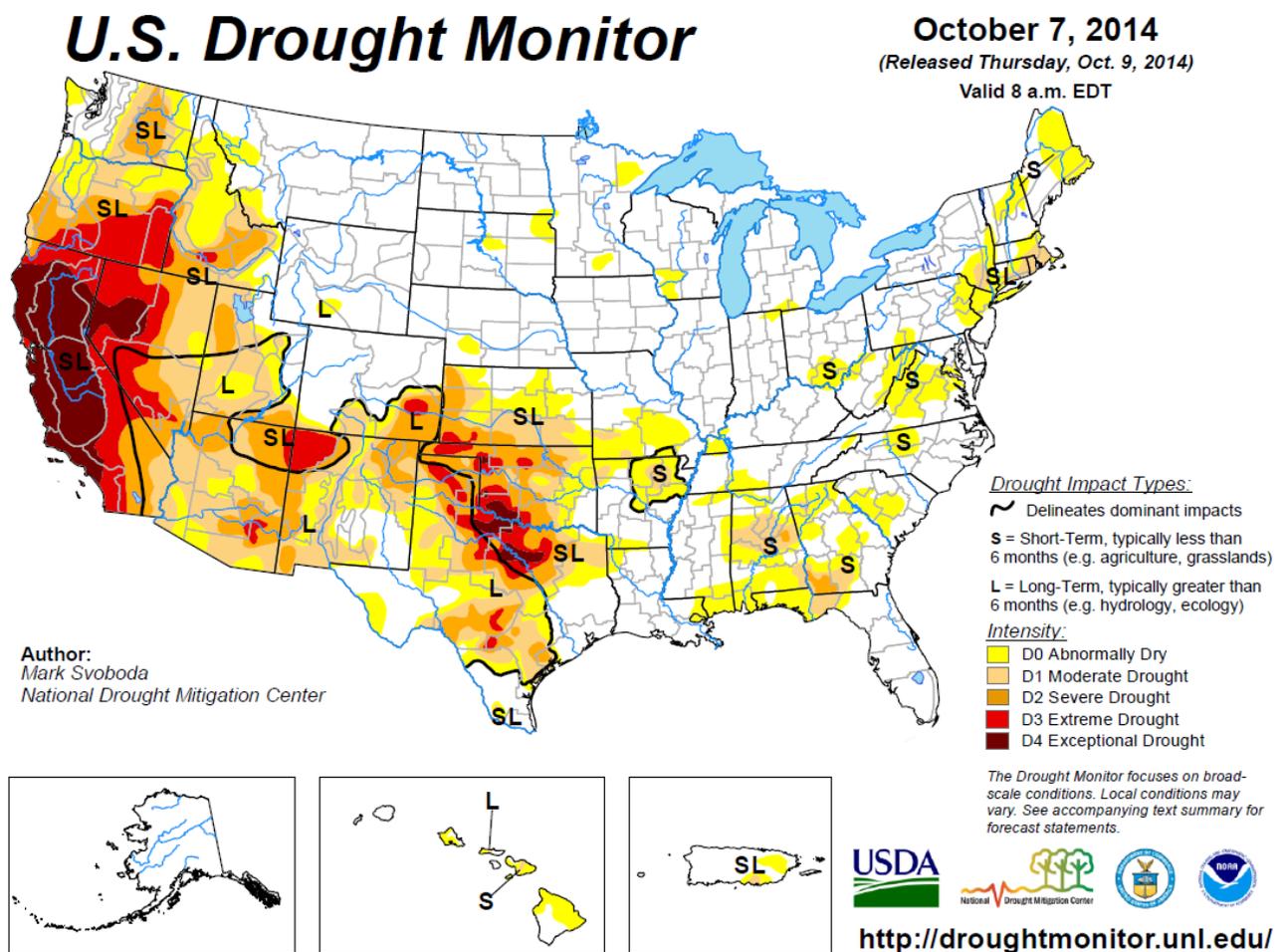


Abbildung 37: US-Dürremonitor für die gesamten Vereinigten Staaten für den 07.10.2014 (The U.S. Drought Monitor is jointly produced by the National Drought Mitigation Center at the University of Nebraska-Lincoln, the United States Department of Agriculture, and the National Oceanic and Atmospheric Administration. Map courtesy of NDMC-UNL.)

Die Schlüsselparameter werden objektiv skaliert und in fünf Dürrekategorien D0 bis D4 eingeordnet (Tabelle 35). Neben Angaben zur Dürrekategorie werden auch Informationen bereitgestellt, welche Sektoren von der Dürre betroffen sind (A: landwirtschaftliche Auswirkungen, W: hydrologische Auswirkungen, F: hohes Wald-

brandrisiko) und auf welcher Zeitskala die Dürre vorliegt (S – Kurzzeit: typischerweise weniger als sechs Monate → betroffen ist z. B. die Landwirtschaft; L – Langzeit: typischerweise mehr als sechs Monate → betroffen sind z. B. Hydrologie und Ökologie).

Tabelle 35: Klassifikation des *Drought Monitor* (Verändert nach <http://droughtmonitor.unl.edu/AboutUs/ClassificationScheme.aspx>)

Kat. ¹	Beschreibung	Mögliche Auswirkungen	PDI	SPI	Perzentile ²
D0	Unnormal trocken	Beginnende Dürre: Kurzfristige Trockenheit verlangsamt das Anpflanzen und das Wachstum von Getreide und Weide. Aus einer Dürre heraustretend: noch einige fortbestehende Wasserdefizite; Weiden oder Getreide noch nicht vollständig erholt	-1.0 bis -1.9	-0.5 bis -0.7	21-30
D1	Moderate Dürre	Einiger Schaden an Getreide, Weiden, geringe Stände in Flüssen, Talsperren oder Brunnen; sich entwickelnde oder drohende Wasserknappheit; freiwillige Wassernutzungseinschränkungen gefordert	-2.0 bis -2.9	-0.8 bis -1.2	11-20
D2	Schwere Dürre	Ernte- oder Weideverluste sind wahrscheinlich; häufige Wasserversorgungseingpässe; Wassernutzungseinschränkungen gefordert	-3.0 bis -3.9	-1.3 bis -1.5	6-10
D3	Extreme Dürre	Erhebliche Ernte-/Weideverluste; verbreitete Wasserknappheit und Wasserbeschränkungen	-4.0 bis -4.9	-1.6 bis -1.9	3-5
D4	Außergewöhnliche Dürre	Außergewöhnliche und weit verbreitete Ernte-/Weideverluste; Wasserknappheit in Talsperren, Flüssen und Brunnen führt zu Wassernotlagen	-5.0 oder weniger	-2.0 oder weniger	0-2

1: Kat. = Kategorie; 2: Perzentile: Klassifizierung der perzentilbasierten Indizes; dazu gehören CPC Bodenfeuchte-Modell, USGS wöchentliche Abflussdaten und objektive Kurz- und Langfrist-Dürreindikatoren-Blends (Kurzzeit-Dürreindikatoren-Blends fokussieren auf den 1-3 Monatsniederschlag und die Langzeit-Blends auf Zeiträume von 6-60 Monaten)

Die DM-Karten basieren auf vielfältigen objektiven Inputs, die endgültigen Karten werden jedoch manuell angepasst, um die realen Bedingungen, wie sie von einer Vielzahl von Experten im ganzen Land berichtet werden, widerzuspiegeln (SVOBODA 2000). Demnach ist der DM ein Konsensprodukt, das die kollektive Beurteilung vieler Experten basierend auf verschiedenen Indikatoren widerspiegelt. Eine Limitation des DM liegt in seinem Versuch, Dürre auf verschiedenen zeitlichen Skalen in einer Karte abzubilden.

Anlage 4-2: Nordamerikanischer Dürremonitor (*North American Drought Monitor, NADM*)

Drei Jahre nach dem US-Dürremonitor wurde 2002 der Nordamerikanische Dürremonitor NADM ins Leben gerufen (SIVAKUMAR et al. 2011). Wie der US Dürremonitor, verbindet auch der NADM verschiedene Indizes (Abbildung 38). Dazu wird von allen drei Partnerländern Mexiko, Canada und USA das gleiche Perzentilschema verwendet, nur der Input (an Indizes) kann etwas abweichen – je nachdem, welche Daten von den Partnern zeitnah bereitgestellt werden können und welche nationalen Indizes bevorzugt werden. Der monatliche Autor des NADM, der zwischen den drei Partnerländern rotiert, ist dafür verantwortlich, die für jedes Land erzeugten GIS-shape Files zu verbinden und etwaige Unstimmigkeiten an den Grenzen in Einklang zu bringen.

North American Drought Monitor

September 30, 2014

Released: Friday, October 10, 2014

<http://www.ncdc.noaa.gov/nadm.html>

Analysts:

Canada - Trevor Hadwen
Mexico - Reynaldo Pascual
Adelina Albanil
U.S.A. - Brian Fuchs*
Richard Heim

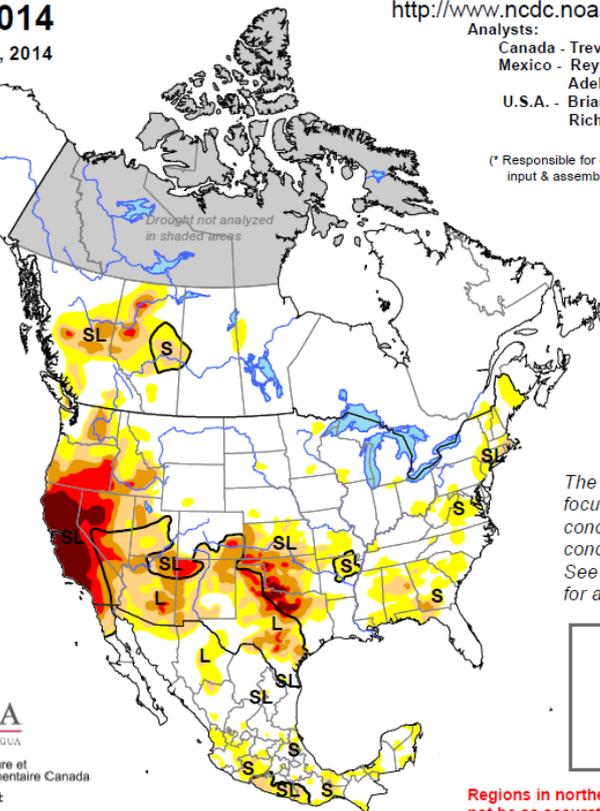
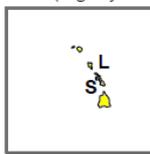
(* Responsible for collecting analysts' input & assembling the NA-DM map)

Intensity:

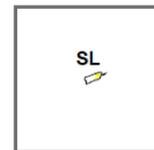
- D0 Abnormally Dry
- D1 Drought - Moderate
- D2 Drought - Severe
- D3 Drought - Extreme
- D4 Drought - Exceptional

Drought Impact Types:

- ~ Delineates dominant impacts
- S = Short-Term, typically <6 months (e.g. agriculture, grasslands)
- L = Long-Term, typically >6 months (e.g. hydrology, ecology)



The Drought Monitor focuses on broad-scale conditions. Local conditions may vary. See accompanying text for a general summary.



Regions in northern Canada may not be as accurate as other regions due to limited information.

Abbildung 38: Nordamerikanischer Dürremonitor für den 30. September 2014 (<http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/nadm-maps.php>)

Anlage 4-3: Index der Vegetationsreaktion auf Dürre (Vegetation Drought Response Index, VegDRI)

Der Vegetations-Dürre-Reaktions-Index (Vegetation Drought Response Index VegDRI) wird vom nationalen Dürremitigationszentrum der Vereinigten Staaten (National Drought Mitigation Center NDMC) in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Erdressourcenbeobachtung und Wissenschaft (Center for Earth Resources Observation and Science EROS) des Geologischen Dienstes der USA (US Geological Survey USGS) und dem regionalen Klimazentrum der High Plains (High Plains Regional Climate Center HPRCC) produziert und operationell für das Festland der USA berechnet.

Karten des VegDRI (Abbildung 39), die Informationen zu den Dürreauswirkungen auf die Vegetation liefern, wurden zunächst alle zwei Wochen, später wöchentlich in einer Auflösung vom 1 km produziert. Auch wenn sich der NDVI als effektives Werkzeug zur Überwachung des Vegetationszustandes erwiesen hat, so können doch auch andere Umweltfaktoren (z. B. Feuer, Überschwemmung, Hagel, Pflanzenschädlinge und -krankheiten sowie Landnutzungsänderungen) ein Signal hervorrufen, dass Dürren nachahmt (SIVAKUMAR et al. 2011). Daher ist es schwierig, rein auf der Analyse von NDVI-Daten dürrebetroffene Regionen von jenen zu unterscheiden, die nicht von Dürren beeinträchtigt sind. Im VegDRI-Konzept werden klimabasierte Dürreindizes und andere Umweltinformationen dazu genutzt, die NDVI-Anomalien zu isolieren, die tatsächlich mit Dürren verbunden sind. Die Berechnung des VegDRI bezieht also satellitenbasierte Beobachtungen des Vegetationszustandes, Klimadaten und andere biophysikalische Faktoren wie Landbedeckung/-nutzung, Bodeneigenschaften und ökologische Verhältnisse ein, um mit Dürren verbundene Stressverhältnisse der Vegetation abzubilden (BROWN et al. 2008). Zu den einbezogenen klimabezogenen Variablen gehören der Palmer-Index

(PDSI) und der Standardisierte Niederschlagsindex (SPI; 36 Wochen). Es wird jedoch noch getestet inwieweit Dürreindikatoren für kürzere Zeitskalen, wie der Palmer-Z-Index und kürzere SPI (z.B. 4 oder 8 Wochen) einbezogen werden können. Die einbezogenen satellitenabgeleiteten Vegetationszustandsinformationen sind die *Percent Average Seasonal Greenness (PASG)* und die *Start of Season Anomaly (SOSA)*. Beide Variablen werden aus dem Normalisierten Differenzvegetationsindex (*normalized difference vegetation index NDVI*; von NOAA's *Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR* abgeleitet) berechnet, um die saisonale Vegetationsdynamik zu quantifizieren.

SIVAKUMAR et al. (2011) halten fest, dass verschiedene Länder (z. B. Argentinien, Indien, die Tschechische Republik und andere europäische Nationen) Interesse an der Ausweitung des VegDRI-Konzeptes auf andere Gebiete der Welt zeigen.

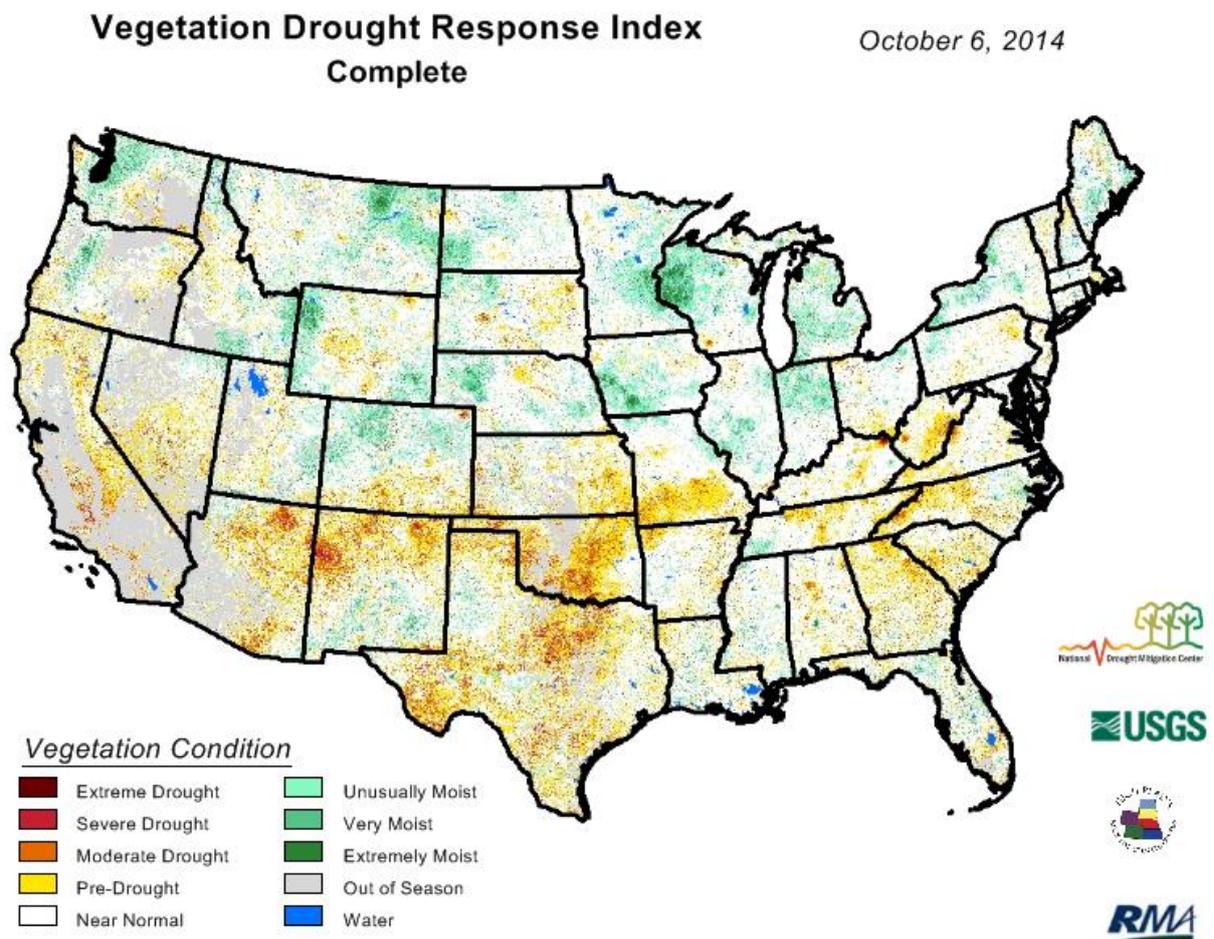


Abbildung 39: Karte des Vegetation Drought Response Index am 06.10.2014 für die USA
(<http://vegdiri.unl.edu/>)

Anlage 4-4: Kombiniertes Dürreindex des EDO (EDO's Combined drought index)

Vom Europäischen Dürreobservatorium EDO wird ein kombinierter Index vorgeschlagen, der den SPI, Bodenfeuchteanomalien und Fernerkundungsdaten (fAPAR Anomalien) integriert (SEPULCRE-CANTO et al. 2012). Er wird auf der Internetseite des EDO in Kartenform für 10-Tageszeiträume zur Verfügung gestellt (Abbildung 40). Die räumliche Auflösung beträgt 1/24 Dezimalgrad.

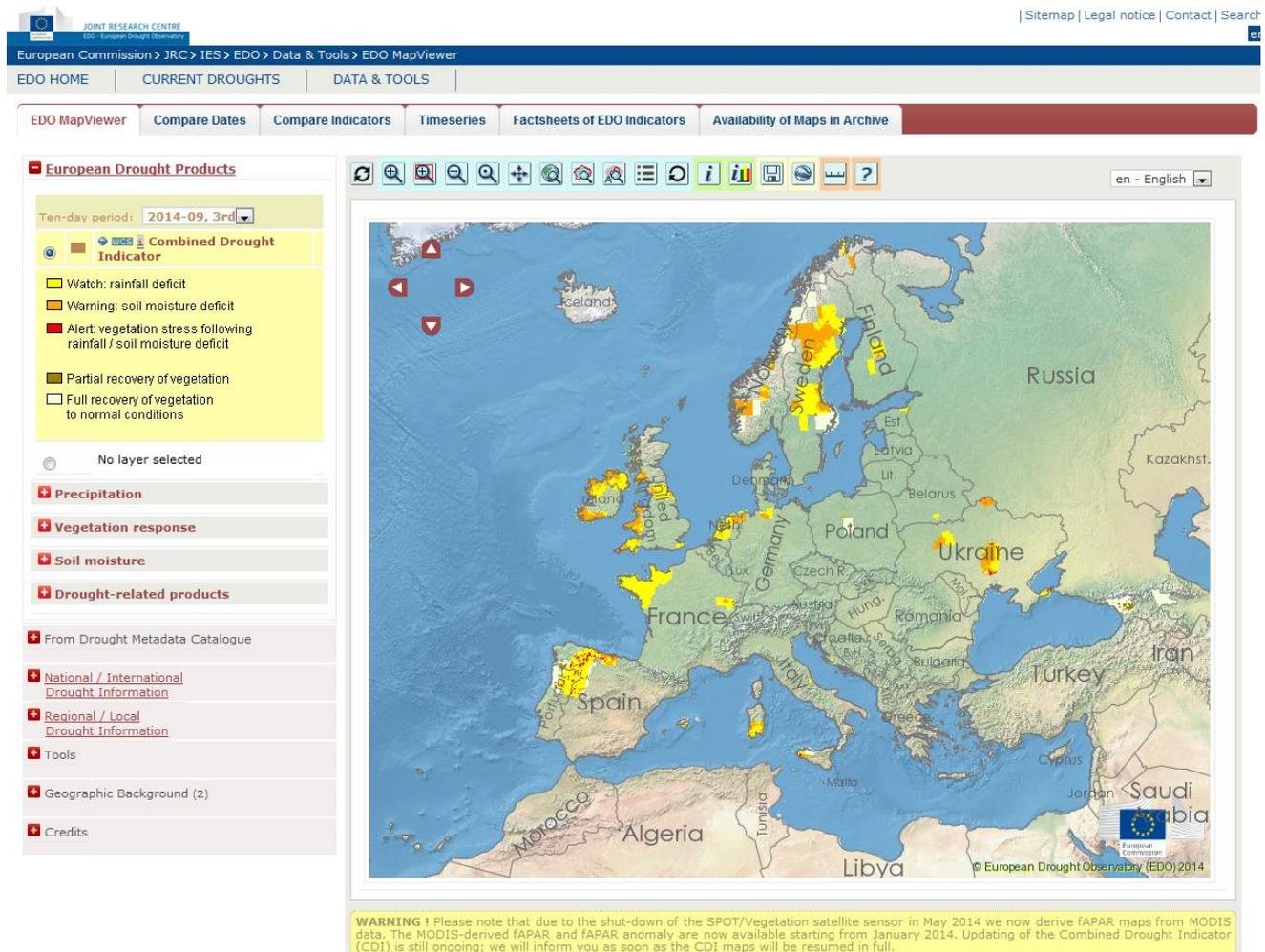


Abbildung 40: Kombiniertes Dürreindex für Europa für den dritten 10-Tageszeitraum des Septembers 2014 (<http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1120>)

Der Anteil der absorbierten fotosynthetisch aktiven Strahlung (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* fAPAR) stellt den Anteil der solaren Energie dar, der von der Vegetation absorbiert wird. GOBRON et al. (2005 und 2007) schlugen den fAPAR aufgrund seiner Sensitivität gegenüber Vegetationsstress als Dürreindex vor. Durch Dürren kann es zu einer verringerten Wachstumsrate der Vegetation kommen, die entweder durch Veränderungen in der Aufnahme der Solarstrahlung durch die Pflanze oder durch Veränderungen in der Lichtnutzungseffizienz verursacht wird.

Der kombinierte Dürreindex ist ein Komposit auf den EDO-Layern SPI-1 und SPI3 zur Identifizierung des Niederschlagsdefizites, Bodenfeuchteanomalie zur Charakterisierung des Effektes des Niederschlagsdefizites auf die Bodenfeuchte und fAPAR-Anomalie zur Charakterisierung der weitergehenden Effekte auf den Zustand der Vegetation. Der SPI-3 wird verwendet, weil verschiedene Studien (z. B. Ji & PETER 2003; ROSSI & NIEMEYER 2012) gezeigt haben, dass der SPI-3 die größten Korrelationen zur Vegetationsreaktion hat und daher am

geeignetsten zur Identifizierung landwirtschaftlicher Dürre ist. Der SPI-1 wird eingebzogen, um extreme Ereignisse mit einzubinden. Ein Monat mit extrem trockenen Bedingungen kann in Abhängigkeit von der Entwicklungsphase der Vegetation den Vegetationszustand dramatisch beeinträchtigen. Der Schwellenwert für die einzelnen Indizes wird auf eine Standardabweichung festgesetzt (-1 für SPI-3 und fAPAR, +1 für Bodenfeuchte pF). Dies entspricht einem Wiederkehrintervall von 6,3 Jahren und unter der SPI-Klassifikation von MCKEE et al. (1993) einer „moderaten Dürre“. Für den SPI-1 wird der Schwellenwert auf -2 gesetzt, sodass nur die Fälle extremer Dürrebedingungen einbezogen werden.

Der Index wird in fünf Stufen eingeteilt („Beobachten“, „Warnung“, „Alarm“, „Teilweise Erholung“ und „Vollständige Erholung“) und in den Karten mit dem in Tabelle 36 dargestellten Farbschema visualisiert.

Tabelle 36: Stufeneinteilung des kombinierten Dürreindex des EDO (<http://edo.jrc.ec.europa.eu>)

Stufe	Beschreibung	Charakterisierung der Dürreindizes
Beobachten (<i>Watch</i>)	Niederschlagsdefizit beobachtet	$SPI-3 < -1$ oder $SPI-1 < -2$
Warnung (<i>Warning</i>)	Niederschlagsdefizit schlägt sich in Bodenfeuchteanomalie nieder	$\Delta pF > 1$ & ($SPI-3 < -1$ oder $SPI-1 < -2$)
Alarm (<i>Alert</i>)	es kommt eine negative Anomalie des Vegetationszustandes hinzu	$\Delta fAPAR < -1$ & ($SPI-3 < -1$ oder $SPI-1 < -2$)
Teilweise Erholung (<i>Partial recovery</i>)	meteorologische Bedingungen sind nach einem Dürrezustand wieder normal – nicht jedoch der Vegetationszustand	($\Delta fAPAR < -1$ & ($SPI-3_{m-1} < -1$ & $SPI-3 > -1$)) od. ($\Delta fAPAR < -1$ & ($SPI-1_{m-1} < -2$ & $SPI-1 > -2$))
Vollständige Erholung (<i>Full recovery</i>)	Vegetationszustand erreicht nach einer Dürre ebenfalls wieder Normalbedingungen	($SPI-3_{m-1} < -1$ & $SPI-3 > -1$) oder ($SPI-1_{m-1} < -2$ & $SPI-1 > -2$)

Das Vorzeichen Δ zeigt an, dass es sich um Anomalien, das Suffix m-1 macht kenntlich, dass es sich um den Vormonat handelt.

Der SPI wird monatlich berechnet und die anderen beiden Indizes alle 10 Tage. Zur Berechnung des kombinierten Dürreindex und der Analyse entsprechend Tabelle 36 wird eine zeitliche Verzögerung zwischen den drei Komponenten des Index eingebaut. So wird der für einen bestimmten Monat berechnete SPI den Bodenfeuchteanomalien der zweiten und dritten Dekade dieses Monats sowie der ersten Dekade des kommenden Monats und dem fAPAR der dritten Dekade dieses Monats und der ersten und zweiten Dekade des kommenden Monats gegenübergestellt. Dabei besteht ein Monat aus drei Dekaden (vom 1. bis 10., vom 11. bis 20. und vom 21. bis zum letzten Tag des Monats).

Die „Alarm“-Stufe des Index sollte nur während der Wachstumsphase berücksichtigt werden. Diese dauert in Europa etwa von April bis Oktober, jedoch haben einige Länder in Südeuropa längere Wachstumsphasen. Weitere Forschungen werden sich daher der Einbeziehung phänologischer Informationen (wie räumlicher phänologischer Indizes) widmen.

Problematisch beim Kombinierten Dürreindex ist v. a. die Einbeziehung der fAPAR. Diese basiert auf optischen Spektren und reagiert daher empfindlich auf Wolken. Diese Wolken werden normalerweise maskiert, jedoch werden tiefe Wolken manchmal nicht detektiert und resultieren dann in fehlerhaften Werten, v. a. in den nördlichen Breiten. Zur Lösung dieses Problems sind Weiterentwicklungen des Index unter Nutzung mehrerer mit dem Vegetationszustand verbundener Indizes geplant.

Anlage 5: Wesentliche Inhalte und Ergebnisse bekannter Dürrereviews und Vergleichsstudien

Anlage 5-1: Olapido (1985): A comparative performance of three meteorological drought indices 179

Anlage 5-2: KEYANTASH & DRACUP (2002): The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices 179

Anlage 5-3: HEIM (2002): A review of twentieth-century drought indices used in the United States 181

Anlage 5-4: MORID et al. (2006): Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran 182

Anlage 5-5: AMOR et al. (2009) Using and Testing Drought Indicators 183

Anlage 5-6: VICENTE-SERRANO et al. (2012a): Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications 184

Anlage 5-1: OLAPIDO (1985): A comparative performance of three meteorological drought indices

OLAPIDO (1985) verglich drei Indizes (*Rainfall Anomaly Index RAI*, *Bhalme & Mooley Drought Index BMDI* und *Palmer Drought Severity Index PDSI*) hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit der Wiedergabe von Perioden unterschiedlicher Dürreintensität am Beispiel von 407 Stationen in den *Great Plains*, USA (Abbildung 41). Dabei beschränkte er sich auf die Monate April bis September, in denen der Großteil der untersuchten Stationen 75 % des Jahresniederschlags erhält.

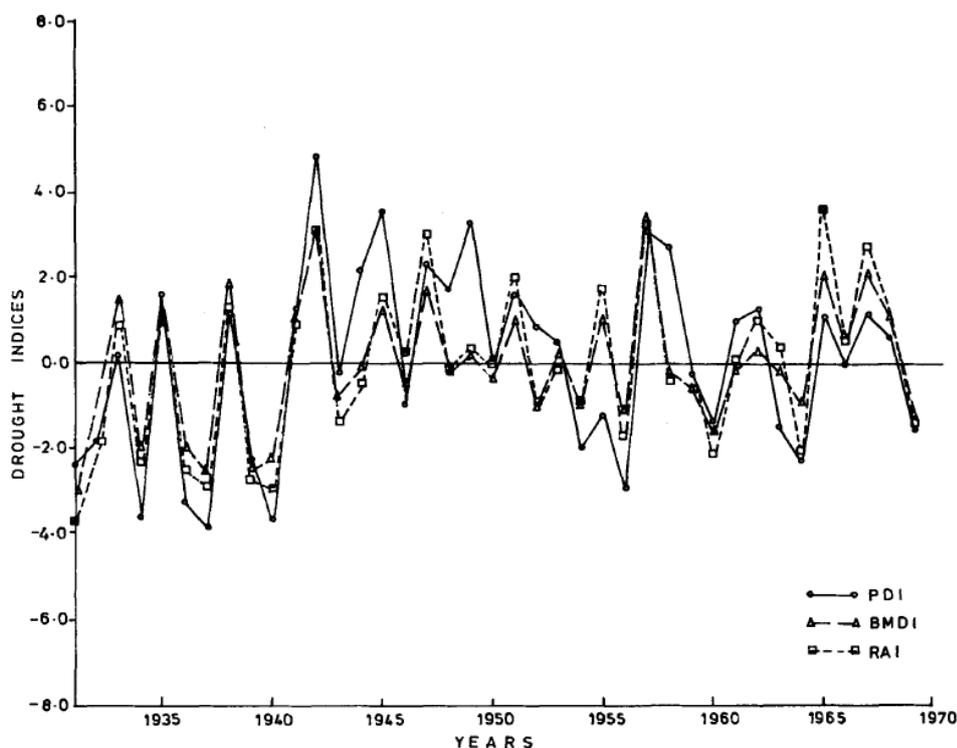


Abbildung 41: Jahreszeitenmittel der Palmer (PDI), Bhalme & Mooley (BMDI) und Rooy (RAI) Dürreindizes für den Distrikt Panhandle in Nebraska, USA (OLAPIDO 1985)

Die drei Indizes haben eine ähnliche Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Detektion meteorologischer Trockenphasen. Weil der Bhalme-Mooley-Dürreindex BMDI auch die Bedeutung der Niederschlagsvariationen von Monat zu Monat einbezieht, wird er von OLAPIDO (1985) als überlegener Dürreindex gegenüber dem einfacher zu berechnenden RAI angesehen.

Anlage 5-2: KEYANTASH & DRACUP (2002): The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices

KEYANTASH & DRACUP (2002) verglichen unter Verwendung von sechs gewichteten Kriterien die gebräuchlichsten meteorologischen, landwirtschaftlichen und hydrologischen Dürreindizes für zwei Testregionen in Oregon, USA (Koeppen Klimaklassifikation Cfa und Cfb):

- **meteorologisch:** diskrete und kumulative Niederschlagsanomalien CPD, Niederschlagsdezile DI, *Palmer Drought Severity Index PDSI*, *Drought Area Index DAI*, *Rainfall Anomaly Index RAI*, *Standardized Precipitation Index SPI*,
- **landwirtschaftlich:** *Crop Moisture Index CMI*, Palmer's Feuchteanomalienindex (Z-Index), berechnete Bodenfeuchte, Bodenfeuchteanomalien-Index und

■ **hydrologisch:** Gesamtwasserdefizit, kumulative Abflussanomalien, *Palmer Hydrological Drought Index* PDHI, *Surface Water Supply Index* SWSI

Die verwendeten **Kriterien** sind:

- Robustheit (*robustness*): Verwendbarkeit über ein breites Spektrum physikalischer Bedingungen)
- Anwendbarkeit (*tractability*): praktische Aspekte des Index hinsichtlich z. B. Berechnungsaufwand und Datenanforderungen)
- Transparenz (*transparency*): Klarheit der Zielsetzung und Grundüberlegungen hinter dem Index)
- Komplexität (*sophistication*): konzeptionelle Verdienste des Ansatzes)
- Erweiterungsfähigkeit (*extendability*): Grad zu dem der Index in der Zeit ausgeweitet werden kann zu alternativen Dürreszenarios) und
- Dimensionalität (*dimensionality*): Verbindung des Index zur physikalischen Welt → Einheiten bzw. Verhältnisse)

Nach diesen Kriterien sind der Dezil-Index und der SPI die überlegenen meteorologischen Indizes, während der DAI und der PDSI am schlechtesten bewertet werden. Für den SPI und den RAI wurden große Korrelationen festgestellt (Abbildung 42).

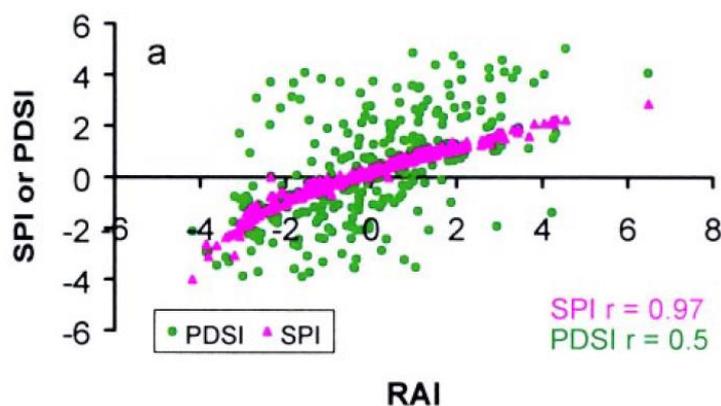


Abbildung 42: Vergleich des meteorologischen Dürre-Index RAI mit dem SPI (1-Monat) und dem PDSI für Willamette Valley, USA; die Korrelationskoeffizienten sind in der rechten unteren Ecke angegeben (aus KEYANTASH & DRACUP 2002)

Bei den landwirtschaftlichen Indizes wurde die berechnete Bodenfeuchte am besten bewertet und bei den hydrologischen Indizes das Gesamtwasserdefizit. Am schlechtesten schnitten der Crop Moisture Index CMI und der Palmer Hydrological Drought Index PHDI ab. Abbildung 43 zeigt, dass der Verlauf von Z-Index und berechneter Bodenfeuchte nicht ganz transparent ist. Manchmal verlaufen die Kurven nahezu in Phase und während anderer Perioden scheint die Beziehung zeitlich verzögert zu sein. Auch die Größe der Reaktion auf das Wetter ist unterschiedlich. Daraus schlussfolgern die Autoren, dass landwirtschaftliche Dürre wohl die am schwierigsten objektiv zu bestimmende Dürreart ist. Ohne ein (inter)nationales Bodenfeuchtemessnetz werden die berechneten Größen immer schwierig zu beurteilen sein. Hinsichtlich der hydrologischen Dürreindizes PHDI und SWSI stellen KEYANTASH & DRACUP (2002) fest, dass sie recht gut miteinander korreliert und zumindest qualitativ ein konsistentes Maß der hydrologischen Dürrebedingungen sind (Abbildung 44).

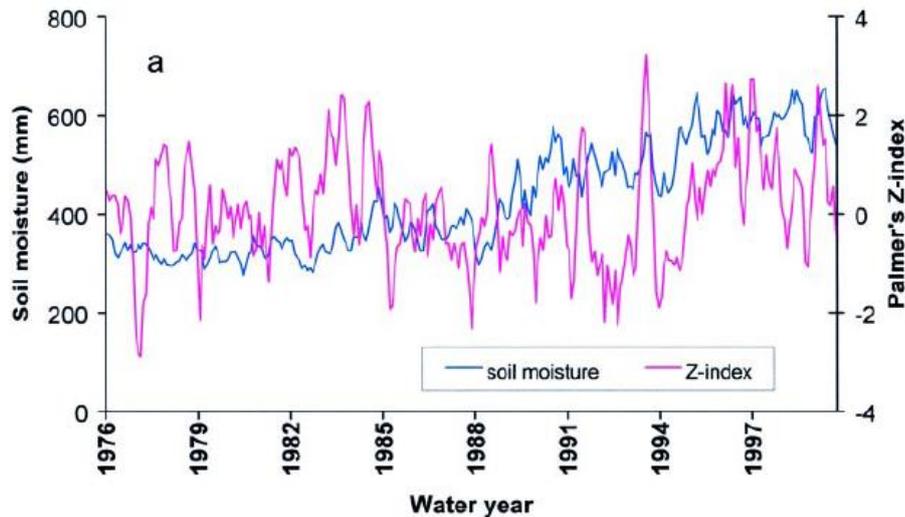


Abbildung 43: Vergleich der landwirtschaftlichen Dürreindizes Bodenfeuchte (soil moisture) und Z-Index für Willamette Valley, USA (aus KEYANTASH & DRACUP 2002)

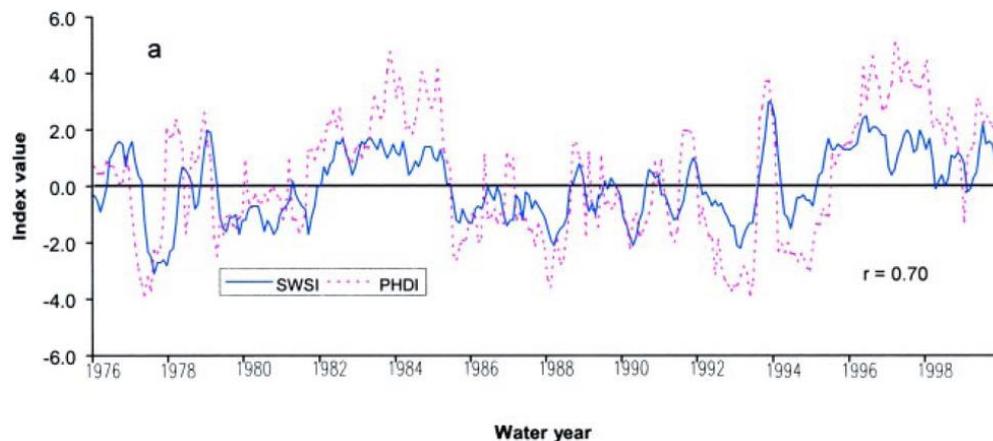


Abbildung 44: Vergleich der hydrologischen Dürreindizes SWSI und PHDI für Willamette Valley, USA (aus KEYANTASH & DRACUP 2002)

Exakte Vergleiche der Indexwerte sind nach Meinung von KEYANTASH & DRACUP (2002) in gewisser Hinsicht bedeutungslos, weil jeder Index einen unterschiedlichen Ansatz zur Bestimmung des dimensionslosen Wertes der Größe des Wasserüberschusses oder -defizites verfolgt.

Anlage 5-3: HEIM (2002): A review of twentieth-century drought indices used in the United States

HEIM (2002) beschrieb und verglich die historische Entwicklung einer Vielzahl von Dürreindizes auf Tages- und Monatsbasis. HEIM (2002) hält fest, dass sich die Entwicklung von Dürreindizes innerhalb der letzten zwei Jahrhunderte langsam von simplifizierenden Ansätzen, die auf einem Maß des Niederschlagsdefizits beruhen, hin zu komplexeren, problemspezifischen Modellen entwickelt hat. Diese Modelle entwickeln sich mit der Verfügbarkeit neuer Datenquellen immer weiter. Die Einbeziehung der Evapotranspiration als ein Maß des Wasserbedarfs durch THORNTON führte zu dem Meilenstein in der Indexentwicklung – Palmers wasserbilanz-basierter Dürreindex. Jeder umfassende Index, der auf nationaler Ebene angewandt werden kann, muss sich mit dem Feuchtigkeitsstatus in der gesamten Umwelt befassen. Palmer hat dies versucht, sah sich jedoch dem Dilemma gegenüber einen komplizierten Index einfach zu halten. Dementsprechend wurde sein Index hinsichtlich der Handhabung verschiedener Faktoren und der Verwendung eines 2-Schichten-Bodenmodells

viel kritisiert. Der SWSI ergänzt den Palmer-Index, indem er Faktoren wie Schneedecke und tieferes Grundwasser mit einbezieht. Jedoch ist er ein regionaler Index, der zumeist nur für die Einzugsgebiete im Westen der USA berechnet wird.

Am Ende des 20. Jahrhunderts schlug das Dürremonitoring mit der Einrichtung des „Dürremonitors“ (SVOBODA 2000) eine etwas andere Richtung ein. Der Dürremonitor versucht, den Feuchtezustand der Umwelt zu bewerten, indem er zahlreiche verfügbare Indizes einbezieht. Einige dieser Indizes können dabei in eine gemeinsame standardisierte Form gebracht werden wie der Perzentil-Klassifizierung. Dadurch können sie in einen objektiven „blended“ Index integriert werden. Andere Indizes bedürfen jedoch der subjektiven Interpretation, um nützlich zu sein.

Anlage 5-4: MORID et al. (2006): Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran

MORID et al. (2006) analysierten im Iran sieben verschiedene, rein auf Niederschlagsdaten basierende meteorologische Dürreindizes (Dezil-Index DI, Prozent-vom-Normalen PN, Standard Precipitation Index SPI, China-Z Index CZI, modified CZI MCZI, Z-Score und Effectiver Dürreindex EDI). Vier der Indikatoren sind in Abbildung 45 für eine Beispielstation als Scatterplot gegenüber dem SPI als Referenz aufgetragen.

MORID et al. (2006) bewerteten den Dezil-Indikator als „überempfindlich“; er führe zu unrealistisch hohen zeitlichen und räumlichen Variationen in den Feuchtebedingungen, insbesondere im Sommer. Die Autoren bemerkten jedoch auch, dass diese Sensitivität durch die Verwendung zeitlicher Skalen von mehr als einem Monat reduziert werden kann. MORID et al. (2006) stellten des Weiteren die Bedeutung der Verwendung langer Zeitreihen für die Dürreanalyse heraus. Hinsichtlich des SPI und des China-Z-Index stellten sie trotz der verschiedenen zugrundeliegenden statistischen Verteilungsfunktionen eine ähnliche Fähigkeit zur Identifikation und zum Monitoring von Dürre fest. Sie reagieren jedoch beide recht langsam auf das Einsetzen von Dürre. Nach ihrer Analyse war der Effektive Dürreindex EDI sensitiver auf das Einsetzen von Dürrebedingungen, weshalb sie den EDI zusammen mit dem SPI für ein operationelles Dürremonitoring in ihrer Provinz vorschlugen.

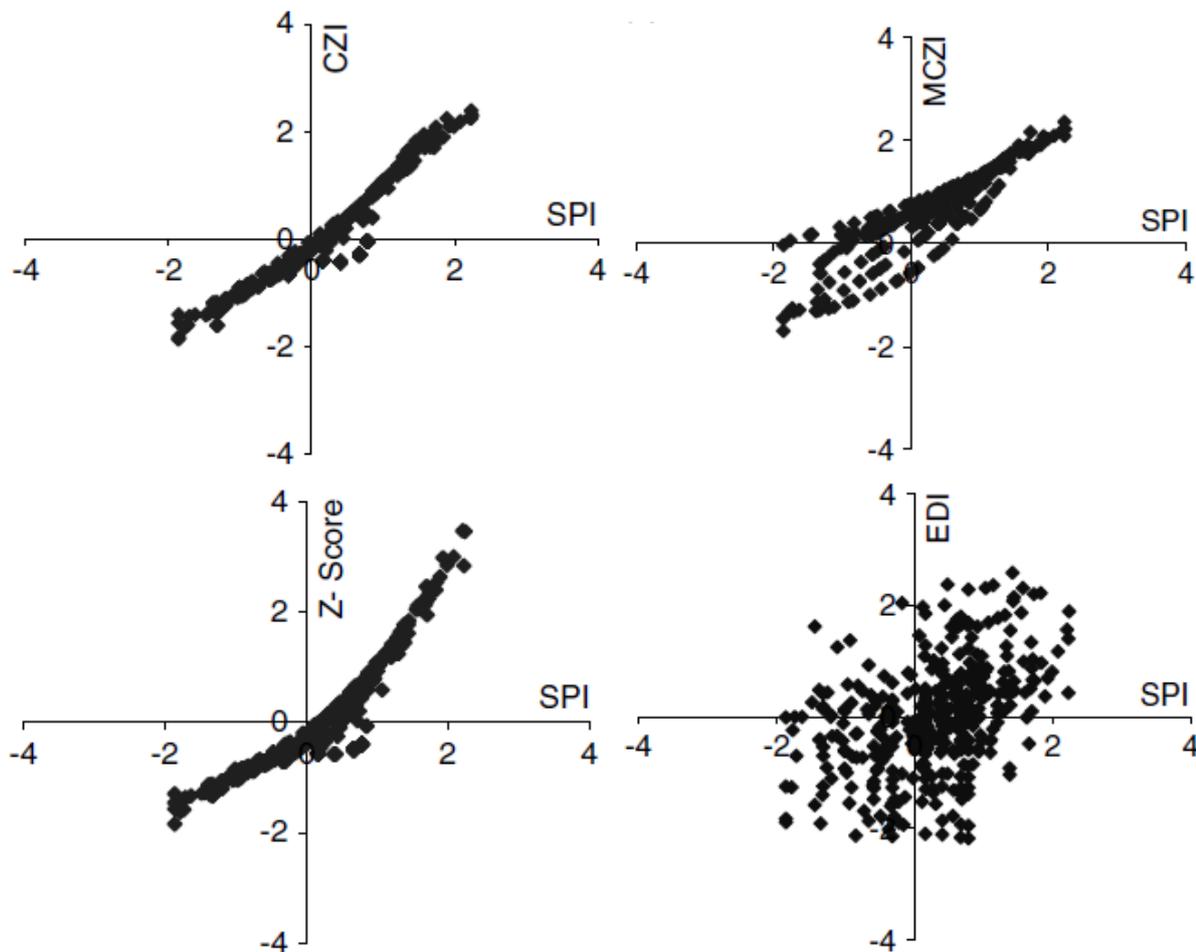


Abbildung 45: Scatterplot für den SPI gegenüber den Indikatoren CZI, MCZI, Z-Score und EDI für die Station Deh Someh von 1970 bis 2001

Anlage 5-5: AMOR et al. (2009) Using and Testing Drought Indicators

Für die Gemeinde Madrid und ihre Wasserversorgungssysteme untersuchten AMOR et al. (2009) verschiedene meteorologische und hydrologische Dürreindizes, die Variablen wie Niederschlag, Temperatur, Abfluss und simulierte Wasserspeicherung einbezogen. Die getesteten Dürreindizes umfassen den SPI, den SQI, den SRI (ein Versuch den SPI-Ansatz auch für den Gesamtwasserzufluss und das Wasserspeicherniveau auszuweiten), den PSDI, den Reconnaissance Dürreindex RDI und die von CANCELLIERE et al. (2005) vorgeschlagene „Run Method“. In ihren Studien bestätigten AMOR et al. (2009) die allgemeine beschreibende Leistung der Indizes. Die Indizes waren effizient in der Lage, historische Dürren zu charakterisieren und unkomplizierte Möglichkeiten zu liefern, ihre Sensitivität in objektiven, allgemeinen Gesichtspunkten zu vergleichen. Die Autoren hoben die Fähigkeit der „Run Method“ hervor, solide Werte von Wiederkehrperioden aktueller und hypothetischer Dürren zu liefern. AMOR et al. (2009) untersuchten auch die Fähigkeit der Indizes, Dürren in ihrer Entwicklung vorherzusehen. Sie konnten jedoch keine signifikante Fähigkeit der Indizes, Dürren oder ihre zukünftige Entwicklung vorauszuahnen, feststellen. Eine Sequenz von meteorologischer Dürre über hydrologischer Dürre hin zu hydraulischer oder operationaler Dürre konnte nicht festgestellt werden.

Hinsichtlich der potenziellen Nutzbarkeit der Indizes für das Dürremanagement stellten AMOR et al. (2009) fest, dass die generischen Indizes nicht mit den spezifischen Indizes mithalten können, wenn es um die Nutzung als Werkzeug im Entscheidungsprozess des Managements von Dürren geht. Die im Design generischer Indizes notwendigen Vereinfachungen und Verallgemeinerungen vermindern ihre Einsatzfähigkeit für operationale Anwendungen.

Anlage 5-6: VICENTE-SERRANO et al. (2012a): Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications

Nur wenige Wissenschaftler haben die relative Leistungsfähigkeit verschiedener Dürreindikatoren hinsichtlich der Identifikation von Dürreauswirkungen auf verschiedene Systeme untersucht. Dazu gehört die Studie von VICENTE-SERRANO et al. (2012a), in der sechs Indizes (SPI, SPEI und vier Versionen des PDSI) bezüglich ihrer Fähigkeit zum Monitoring von Dürreauswirkungen auf Abfluss, Bodenfeuchte, Waldwachstum und Ernteertrag hin untersucht wurden.

Weil die natürliche Vegetation und landwirtschaftliche Nutzpflanzen unterschiedliche Strategien haben, mit Wasserdefiziten umzugehen (CHAVES et al. 2003), und die Abflussdaten durch unterschiedliche lithologische, Landnutzungs- und Wassermanagementregime beeinflusst sind (LÓPEZ-MORENO et al. 2013), reagieren die verschiedenen hydrologischen, ökologischen und landwirtschaftlichen Systeme gewöhnlich auf unterschiedliche Dürrezeitskalen. Es ist also vorab nicht möglich, die genaue Zeitskala festzulegen, auf der ein bestimmtes System auf Dürre reagiert. Daher bestimmten VICENTE-SERRANO et al. (2012a) die passende Zeitskala des SPI bzw. SPEI über Korrelationsanalysen zu den entsprechenden Impactkategorien.

Für den **Abfluss** nutzen VICENTE-SERRANO et al. (2012a) den standardisierten Abflussindex (*standardized streamflow index* SSI; VICENTE-SERRANO et al. (2012b)). Sie berechneten den SSI aus monatlichen Durchflussaufzeichnungen für 151 Pegel an der Mündung von Einzugsgebieten, wobei sie den von DAI et al. (2009) analysierten Datensatz zugrunde legten. Für den Abfluss liefern SPI und SPEI sehr ähnliche Ergebnisse (Korrelationen zum SSI) zur Bewertung des Abflussregimes bzw. Niedrigwasser. Im Mittel sind die Korrelationen von SPI und SPEI mit dem SSI größer als die der Palmer-Indizes (beste Korrelation für SPEI in 44.4 % der EZG, SPI: 38.4 %; einer der vier Palmer-Indizes: 17.3 %). Dabei sind große Variationen zwischen den Einzugsgebieten zu beobachten. Am größten sind die Korrelationen in den atlantischen EZG in Nordamerika, den EZG in Mitteleuropa und einigen EZG in Südamerika und Afrika, während in asiatischen EZG zumeist nur schwache Korrelationen beobachtet wurden. Auch saisonal schwankt die Größe der Korrelationen, mit größeren Korrelationen im Juli im Vergleich zum Januar. Im Juli fallen die Unterschiede zwischen SPI und SPEI auch deutlicher als übers gesamte Jahr hinweg aus (höhere Korrelationen für SPEI in den Sommermonaten). In den nördlichen Breiten der Nordhemisphäre sind für den PDSI im Sommer höhere Korrelationen als für den SPI beobachtet, jedoch sind diese (über alle Regionen gemittelt) nicht höher als die des SPEI.

Zur Bewertung der Performance der sechs Indikatoren zur Beschreibung von Dürrezuständen bezogen auf die **Bodenfeuchte** nutzten VICENTE-SERRANO et al. (2012a) globale Bodenfeuchtedaten aus dem internationalen Bodenfeuchtenetzwerk (ROBOCK et al. 2000; online verfügbar unter <http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu/>). Auch hinsichtlich der Korrelationen zur Bodenfeuchte liefern SPI und SPEI wiederum bessere Ergebnisse als die Palmer-Indizes (höhere Korrelationen, nur an ca. 15 % der Stationen ist einer der Palmer-Indizes besser als SPI oder SPEI). Dabei sind die Korrelationen zwischen Bodenfeuchte und Dürreindizes von Juli bis Oktober (hier sind die Böden oft weniger stark wassergesättigt als im Frühjahr) größer als für die anderen Monate.

Die Leistungsfähigkeit der sechs Indikatoren zur Beschreibung der Dürreauswirkungen auf das **Baumringwachstum** wurde von VICENTE-SERRANO et al. (2012a) anhand von 1840 jährlichen Baumringbreiten-Reihen aus der internationalen Baumringdatenbank (GRISSINO-MAYER & FRITTS 1997; online verfügbar unter <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>) untersucht. Die höchsten Korrelationen traten im Allgemeinen im Spätfrühling bis Frühsommer auf, wenn das Baumringwachstum am größten ist. Der Großteil der betrachteten Baumringreihen liegt auf der Nordhemisphäre. Während die Unterschiede zwischen SPI und SPEI nur gering ausfallen, wurden zwischen den Palmer-Indizes große Unterschiede festgestellt. Generell sind die Korrelationen stark vom Standort abhängig – in Gebieten, wo das Baumringwachstum hauptsächlich durch die

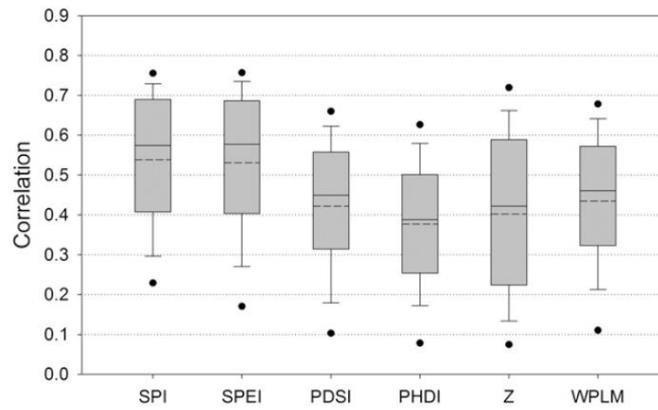
Wasserverfügbarkeit gesteuert wird (semiaride bzw. aride Gebiete), sind die Korrelationen größer als in den nördlicheren Gebieten, wo das Baumringwachstum weniger durch Dürren eingeschränkt ist. An fast 50 % der Messpunkte weist der SPEI die größten Korrelationen auf, in 37,9 % ist es der SPI und nur in 13,7 % der Fällen zeigt einer der Palmer-Indizes die größten Korrelationen.

Hinsichtlich der Korrelation der Dürreindizes zu den Ernteerträgen wurden von VICENTE-SERRANO et al. (2012a) aufgrund ihrer breiten räumlichen Verteilung die Weizenerträge ausgewählt. Für 173 Länder wurden jährliche Ertragsinformationen von der Welternährungsorganisation (FAO; online verfügbar unter <http://faostat.fao.org>) beschafft. Die Ertrags-Dürre-Korrelationen waren dabei für SPI und SPEI im Allgemeinen größer als für die Palmer Dürreindizes. Dabei lieferte der Z-Index deutlich bessere Ergebnisse als die restlichen Palmer-Indizes. Mit einigen Ausnahmen (Australien, Indien, Angola) sind die Ertrags-Dürre-Korrelationen für den SPI und SPEI höher als für den PDSI und den Z-Index. Unter der Klassifikation der Länder nach dem Dürreindex mit der höchsten Ertrags-Dürre-Korrelation sind die meisten Länder der Erde am besten durch den SPEI (49,5 %) oder den SPI (34,4 %) repräsentiert. Die größten weltweiten Korrelationen wurden in semiariden Gebieten (Russland, Kasachstan, Australien, Marokko, Spanien) beobachtet. In anderen Gebieten der Welt können die vorherrschenden humiden Bedingungen oder auch die Bewässerung die Vulnerabilität des Weizens gegenüber Dürre vermindern.

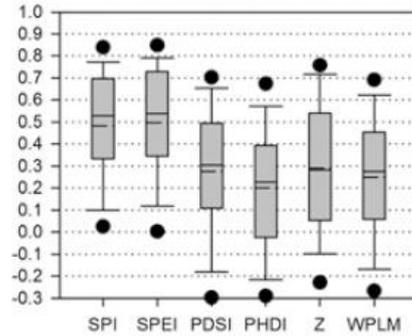
Zusammenfassend stellen VICENTE-SERRANO et al. (2012a) fest, dass, auch wenn verschiedene Palmer-Indizes, die verschiedene Zeitskalen von Dürre repräsentieren, in die Analyse einbezogen wurden, diese nicht flexibel genug sind, um die große Variabilität in der Reaktion auf Dürre wiederzugeben, wie sie in einer bestimmten Region anzutreffen ist. Multiskalare Indizes, wie der SPI oder der SPEI übertreffen in ihrer Leistungsfähigkeit andere Indizes und erlauben eine große Bandbreite von Dürrevulnerabilitäten anzupassen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Palmer-Indizes nicht für einige Anwendungen nützlich sind. Weltweit zeigten DAI et al. (2004) und DAI (2011) gute Korrelationen zwischen dem PDSI und jährlichen Abflüssen sowie der Bodenfeuchte. Auf monatlichen Skalen vermindert sich die Leistungsfähigkeit der Palmer-Indizes. Es gibt jedoch auch Studien mit signifikanten Korrelationen zwischen monatlichen Palmer-Indizes (meist PDSI):

- zu Abflussdaten: ALLEY 1985; SMITH & RICHMAN 1993; TANG & PIECHOTA 2009; ZHAI et al. 2010
- zu Baumringbreitereihen: MEKO et al. 1993; ORWIG & ABRAMS 1997; PIOVESAN et al. 2008
- zu Getreideerträgen: AKINREMI et al. 1996; QUIRING & PAPAKRYIAKOU 2003; SCIAN & DONNARI 1997; MAVROMATIS 2007

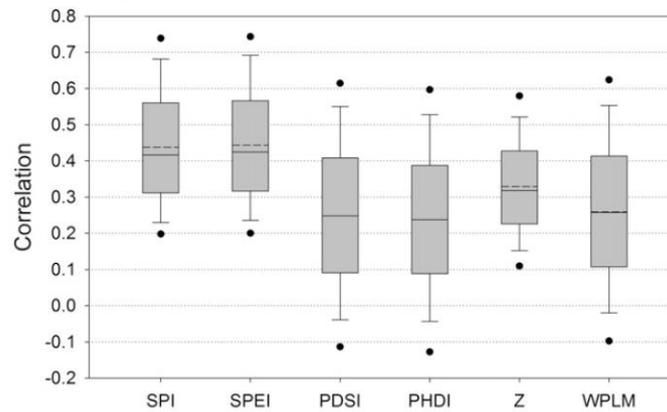
Abfluss



Bodenfeuchte (Juli)



Baumringe



Weizenerträge

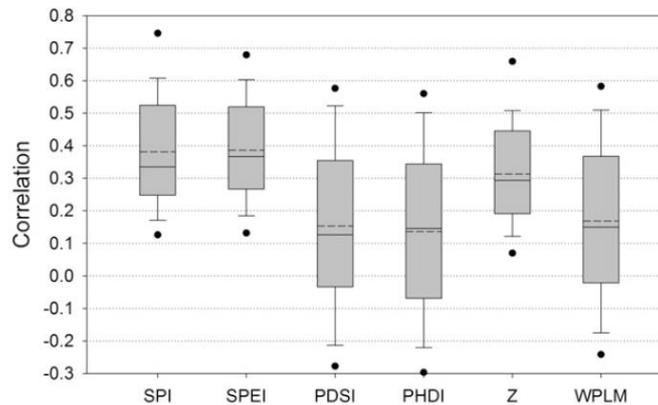


Abbildung 46: Boxplots (durchgezogene/gestrichelte Linie in der Box: Median/Mittelwert) der Korrelationen (Pearson-Koeffizient) zwischen den kontinuierlichen (monatlichen im Falle von Bodenfeuchte) Serien der Impactvariablen und den sechs betrachteten Dürreindizes (VICENTE-SERRANO et al. 2012a)

Wahrscheinlich wären in diesen Systemen höhere Korrelationen für verschiedene Zeitskalen des SPI oder SPEI gefunden worden, aber in einigen Gebieten weltweit ist die beste Reaktion auch für einen der Palmer-Indizes gefunden worden. Dies verdeutlicht nochmals die Notwendigkeit des Testens und Vergleichens der lokalen Performance verschiedener Dürreindikatoren, um den für die interessierende Variable am besten geeigneten Indikator auszuwählen (VICENTE-SERRANO et al. 2012a).

Die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit des SPI und des SPEI sind recht gering (VICENTE-SERRANO et al. 2012a). Daher scheint es gerechtfertigt, den SPI zu bevorzugen, auch weil er geringere Datenansprüche hat. In einigen Bereichen scheint die Performance des SPEI jedoch besser zu sein als die des SPI:

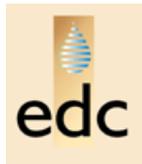
- SPEI zeigt oft höhere Korrelationen als das SPI
- Die Unterschiede zwischen SPI und SPEI sind tendenziell im borealen Sommer größer – in dieser Jahreszeit sind viele Böden und Wälder durch Trockenheitsstress betroffen, weil die meisten von ihnen in der Nordhemisphäre liegen. Damit ist der SPEI der bessere Index für die Jahreszeit, in der rein praktisch die meisten dürrebezogenen Auswirkungen auftreten und daher für das Dürremonitoring besonders kritisch ist.

Auch wenn Niederschlag der Hauptantrieb der Schwere der Dürre (*drought severity*) ist, so kann der Einfluss des atmosphärischen, evaporativen Bedarfs doch nicht vernachlässigt werden, v. a. im Kontext der gegenwärtigen globalen Erwärmung. Die große Rolle der Temperatur als ein Hauptantrieb der Schwere von Dürren wurde während der verheerenden Hitzewelle 2003 in Mitteleuropa deutlich, die das Baumwachstum und die Nettoprimärproduktion über dem Boden (ANPP – *Above-ground net primary production*) fast über dem gesamten Kontinent drastisch reduzierte (CIAIS et al. 2005).

Anlage 6: Übersicht über einige nationale, regionale und kontinentale Dürremonitoringzentren

Anlage 6-1: Europäisches Dürrezentrum (*European Drought Centre*, EDC)..... 189
Anlage 6-2: Europäisches Dürreobservatorium (*European Drought Observatory* EDO)..... 189
Anlage 6-3: Dürremanagementzentrums für Südosteuropa DMCSEE..... 190
Anlage 6-4: Informationsplattform zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz..... 191
Anlage 6-5: Nationales Dürremitigationszentrum der USA..... 192
Anlage 6-6: Südwestasiatischer Dürremonitor (*Southwest Asia Drought Monitor* SADM) 193

Anlage 6-1: Europäisches Dürrezentrum (European Drought Centre, EDC)



Das Europäische Dürrezentrum (<http://www.geo.uio.no/edc/>) ist ein virtuelles Zentrum der Dürreforschung und Dürremanagementorganisationen in Europa. Es verfolgt das Ziel, die Zusammenarbeit zwischen den Wissenschaftlern und der Nutzergemeinde zu fördern. Auf lange Sicht soll die europäische Kooperation verstärkt werden, um die Auswirkungen von Dürre auf Gesellschaft, Ökonomie und Umwelt abzumildern. Trotz seiner primär europäischen Ausrichtung wird sich das EDC auch mit internationalen Projekten, Organisationen und Experten außerhalb Europas vernetzen. (von <http://www.geo.uio.no/edc/>).

Spezifisch möchte das EDC (<http://www.geo.uio.no/edc/>)

- in Richtung eines besseren Verständnisses des Dürrephänomens arbeiten,
- als Plattform für die Initiierung und Diskussion des wissenschaftlichen Fortschritts in der Dürreforschung innerhalb der akademischen Gesellschaft und ebenso als Treffpunkt zwischen Experten verschiedener Disziplinen in der Dürreforschung, der Politik und dem operationalen Management agieren,
- als Diskussionsforum über mit dem nachhaltigem Wasserressourcenmanagement in einem gesamteuropäischen Kontext verbundene politische Themen, wie beispielsweise den Implikationen der Wasserrahmenrichtlinie zu Niedrigwasser und Dürremanagement, agieren,
- Kontakte mit internationalen Organisationen und Programmen (z. B. UNESCO, WMO-HWRP, IAHS), dem EU-Rahmenprogramm, internationalen Flusskommissionen und regionalen Dürrezentren knüpfen,
- in Richtung des Aufbaus eines europäischen Dürrebeobachtungssystems arbeiten, das sich auf die Vorhersage und Überwachung von Dürren auf der gesamteuropäischen Ebene konzentriert,
- die Entwicklung von nationalen Dürremitigationsplänen basierend auf Best-Practice-Richtlinien unterstützen.

Gegenwärtig bietet das EDC (noch) keine aktuellen Informationen bzw. Karten zum Dürrezustand in Europa.

Anlage 6-2: Europäisches Dürreobservatorium (European Drought Observatory, EDO)

Derzeit wird am gemeinsamen Forschungszentrum der Europäischen Kommission (*European Commission, Joint Research Centre EC-JRC*) der Prototyp eines europäischen Dürreobservatoriums EDO (<http://edo.jrc.ec.europa.eu>) entwickelt. Den GEOSS (Projekt EuroGEOSS innerhalb des 7. EU-Rahmenprogramms) und INSPIRE Vorschriften folgend basiert das EDO auf offenen Webdiensten mit dem Ziel die Dürredatenbereitsteller auf kontinentalen, (multi)nationalen und regionalen/lokalen Ebenen miteinander zu verbinden.

Das EDO stellt auf seiner Webseite <http://edo.jrc.ec.europa.eu> dürrerelevante Informationen bereit. Dazu gehören Karten von aus verschiedenen Quellen (Niederschlagsmessungen, Satellitendaten, modellierte Bodenfeuchte) abgeleiteten Indikatoren. Verschiedene Werkzeuge wie Grafiken und der Indikatorenvergleich erlauben es, die Informationen darzustellen und zu analysieren. Die unregelmäßig publizierten Dürrenews geben einen Überblick über die Situation im Falle drohender Dürren.

Das Dürremonitoring basiert auf der Bewertung verschiedener Indizes wie Standardisierter Niederschlagsindex SPI und Indizes zu Bodenfeuchte, Vegetation, Grundwasserständen usw. (Abbildung 40). Diese durch das JRC auf gesamteuropäischer Ebene erfassten Daten werden durch zusätzliche, von nationalen, regionalen und lokalen Organisationen vorbereitete Indizes ergänzt, die entsprechend dokumentiert werden müssen. Die Suche nach verfügbaren Dürreindizes wird durch einen Metadatenkatalog zu Dürreressourcen unterstützt, der an der Universität von Zaragoza im Rahmen des EuroGEOSS-Projektes entwickelt wurde (<http://eurogeoss.unizar.es/Search/Search.html>). Die Dürreindizes werden dann von Experten des JRC interpretiert und unter der Sektion „Dürresituation“ bereitgestellt.



JOINT RESEARCH CENTRE
EDO - European Drought Observatory

European Commission > JRC > IES > EDO > Data & Tools > Compare Dates

EDO HOME | CURRENT DROUGHTS | DATA & TOOLS

Compare Dates

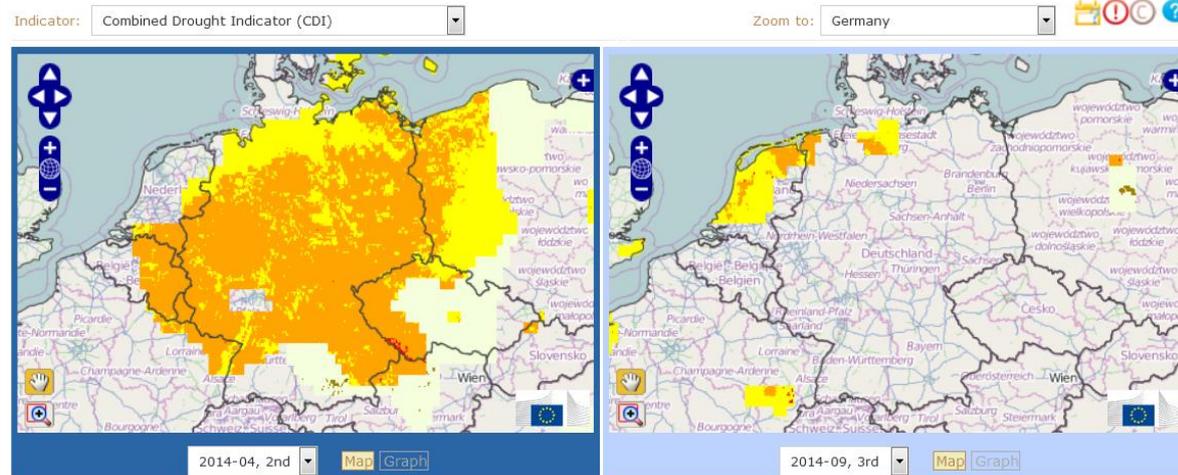


Abbildung 47: Vergleich des Dürrezustandes in Deutschland mittels des kombinierten Dürreindex auf der Webseite des EDO (<http://edo.jrc.ec.europa.eu>)

Basierend auf dem SPI, der Bodenfeuchte und einem aus Satellitendaten abgeleiteten Vegetationsindex wird ein kombinierter Dürreindex erstellt, der in fünf Stufen unterteilt wird (siehe Anlage 4-4). Durch zusätzliche statistische Analysen der Dürredaten werden Vorhersagen der Dürresituation abgeleitet. Dies ist jedoch noch Gegenstand der aktuellen Forschungen am JRC.

Anlage 6-3: Dürremanagementzentrum für Südosteuropa (DMCSEE)



Die Idee des Dürremanagementzentrums für Südosteuropa (*Drought Management Center for South Eastern Europe* DMCSEE; <http://www.dmcsee.org/en/home/>) wurde durch die Internationale Kommission zu Bewässerung und Drainage (*International Commission on Irrigation and Drainage* ICID) und die UN Konvention zur Bekämpfung von Desertifikation (*UN Convention to Combat Desertification* UNCCD) ausgearbeitet. Die Mission des vorgeschlagenen Zentrums besteht in der Koordination und Förderung der Entwicklung, Bewertung und Anwendung von Werkzeugen und Politiken zum Dürreerisikomanagement in Südosteuropa. Dabei verfolgt das DMCSEE das Ziel, die Vorsorgemaßnahmen zu Dürren zu verbessern und die Dürreauswirkungen zu verringern. Daher will sich das DMCSEE auf Beobachtung und Bewertung von Dürre sowie die Bewertung der mit Dürren verbundenen Risiken und Vulnerabilitäten konzentrieren.

Unter Verwendung von GPCC-Daten (1°-Auflösung) werden vorläufige Karten des Niederschlags, des SPI und der Perzentile für die Region vorbereitet. Die Berechnung der Perzentile basiert auf den VASCLimO-Daten in 0,5°-Auflösung für den Zeitraum 1951–2000. Die Daten werden in GRASS GIS importiert und auf eine Auflösung von 0,01° interpoliert. Die Karten werden zweimal im Monat aktualisiert und die endgültigen Karten sind mit einer zweimonatigen Verzögerung verfügbar. Zudem werden Informationen zur über 60 Tage akkumulierten Wasserbilanz und zu den Anomalien der Mitteltemperatur (jeweils als Absolutwert und als Perzentilklasse im Vergleich zur Klimatologie; Abbildung 48) bereitgestellt.

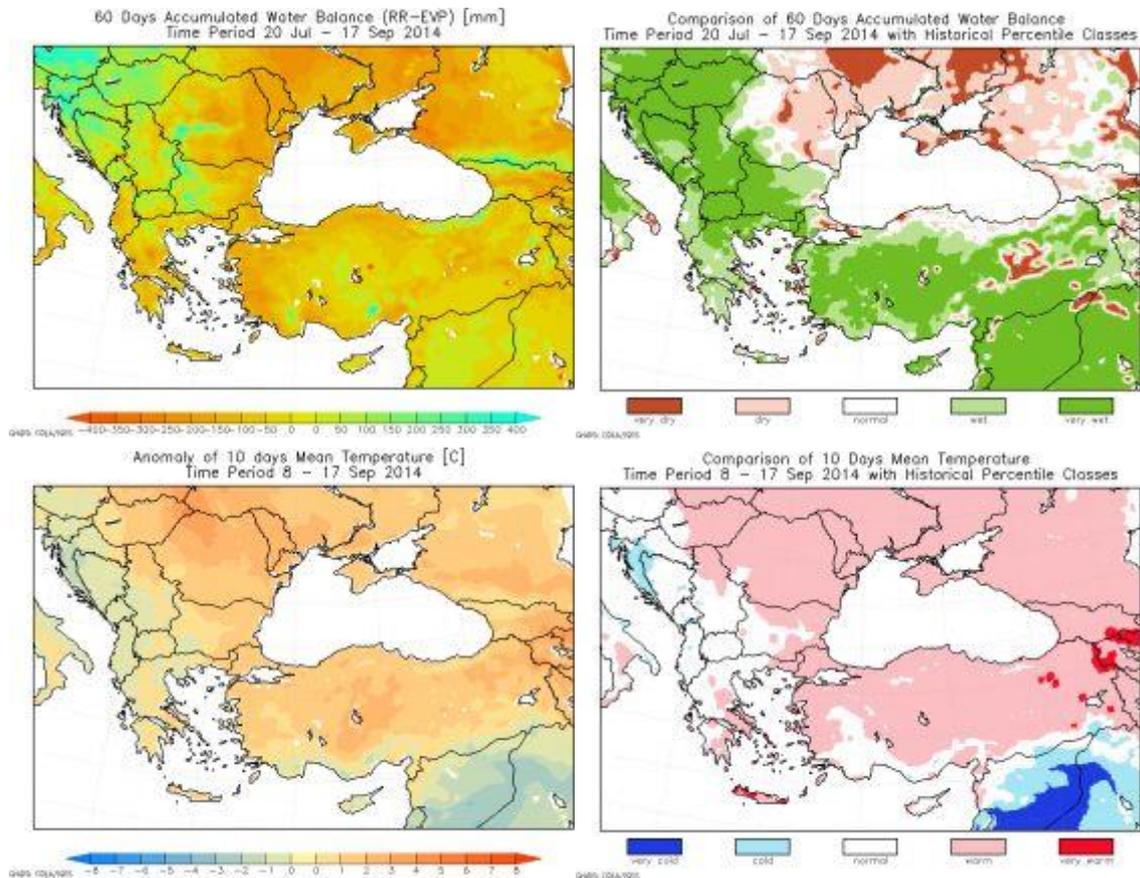


Abbildung 48: Dürresituation in Südosteuropa vom 8. bis 17. September 2014

(http://www.dmcsee.org/en/news/100/drought_situation_in_region_on_17th_september_2014.html)

Anlage 6-4: Informationsplattform zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz

Die Plattform <http://www.drought.ch/> ist im Rahmen des Forschungsprojektes des Nationalen Forschungsprogramms 61 zur Früherkennung von kritischer Trockenheit und Niedrigwasser in der Schweiz entstanden. Es liefert Informationen zu aktueller (Abbildung 49) und bevorstehender Trockenheit bzw. zum Wasserressourcendefizit und fokussiert dabei stark auf Aspekte der hydrologischen Dürren. Die Bewertung der Trockenheit erfolgt basierend auf Abflussdaten für die ein saisonal variierender, auf einem Quantil basierender Grenzwert benutzt wird. Damit wird der saisonale Charakter des Abflusses berücksichtigt und die Trockenheit als seltenes Ereignis, mit Bezug auf den saisonal üblichen Abfluss, definiert. Einbezogen werden die Dauer (der Grenzwertunterschreitung des Abflusses), das Wasserdefiziet während der vergangenen Trockenheitsperioden und die Magnitude/Amplitude der Trockenheitsereignisse (Defizit/Dauer).

Die Betreiber weisen darauf hin, dass sich die Plattform in einer Testphase befindet und es sich bei den Informationen nicht um offizielle Warnungen handelt. Zu beachten ist weiterhin, dass die meisten Informationen automatisch (täglich) generiert werden und daher Fehler/Ausfälle aufweisen können. Seit 2012 wurde die Internetseite anscheinend nicht weiter überarbeitet.



Abbildung 49: Hydrologische Trockenheit in der Schweiz; keine Hinweise auf Trockenheit am 23.10.2013 (<http://www.drought.ch>)

Anlage 6-5: Nationales Dürremitigationszentrum der USA



Das nationale Dürremitigationszentrum der USA (*National Drought Mitigation Center* NDMC; <http://drought.unl.edu/>) wurde 1995 als Nachfolger des Internationalen Dürreinformationszentrums (*International Drought Information Center*; dieses arbeitete noch bis 2002) gegründet. Es hilft Menschen und Institutionen, Maßnahmen zur Reduzierung der gesellschaftlichen Vulnerabilität gegenüber Dürre zu entwickeln und umzusetzen. Dabei wird eher auf Vorsorge und Risikomanagement denn auf Krisenmanagement Wert gelegt.

Zu den Aktivitäten des NDMC gehören die ständig wachsende Internetseite, das Dürremonitoring (einschliesslich der Beteiligung an der Erstellung des US Dürremonitors und die Wartung der entsprechenden Internetseite), die Entwicklung des US Dürreimpactreporters (eine Reihe von internetbasierten Dürremanagementwerkzeugen), Dürreplanung und Mitigation, Dürrepolitik, Politikberatung, Verbundforschung, Workshoporganisation sowie Datenbereitstellung und Beantwortung von Fragen für und von Medien und Öffentlichkeit.

Das NDMC stellt eine Vielzahl von Werkzeugen bereit, die es dem Anwender erlauben, die Schwere und Auswirkungen aktueller Dürren zu bewerten. Dazu gehören der US Dürremonitor (siehe Anlage 4-1), der Dürreimpactreporter (Dürreauswirkungen werden zeitnah gemeldet und in einer Karte dargestellt), der standardisierte Niederschlagsindex SPI auf der Ebene von Klimabezirken, täglich gerasterte SPI-Werte, der Vegetation Drought Response Index VegDRI (siehe Anlage 4-3), Grundwasser und Bodenfeuchtekarten basierend auf Daten von NASA's GRACE Satelliten sowie monatliche Dürre- und Auswirkungszusammenfassungen.

Anlage 6-6: Südwestasiatischer Dürremonitor (*Southwest Asia Drought Monitor* **SADM**)



In Südwestasien (Afghanistan, Pakistan, Westindien) ist im Jahr 2004 ein rein auf Fernerkundungsdaten beruhendes Dürremonitoringnetzwerk aufgebaut worden (<http://dms.iwmi.org/>; THENKABAIL et al. 2004). Es zielt darauf ab, zeitnah Informationen zum Einsetzen, der Fortentwicklung und der räumlichen Ausdehnung von Dürren bereitzustellen. Dazu nutzt es mit Dürreerscheinungen verbundene Indizes von hochaufgelösten Fernerkundungsdaten (MODIS). Dabei wird eine Verbindung zwischen den aus MODIS- und AVHRR-Daten (unterschiedliche Pixelauflösung und optischen Eigenschaften) abgeleiteten Dürreindizes verwendet. Berichte zur Dürreentwicklung können mit einer räumlichen Auflösung von 500 m in 8- oder 16-Tagesintervallen erfolgen.

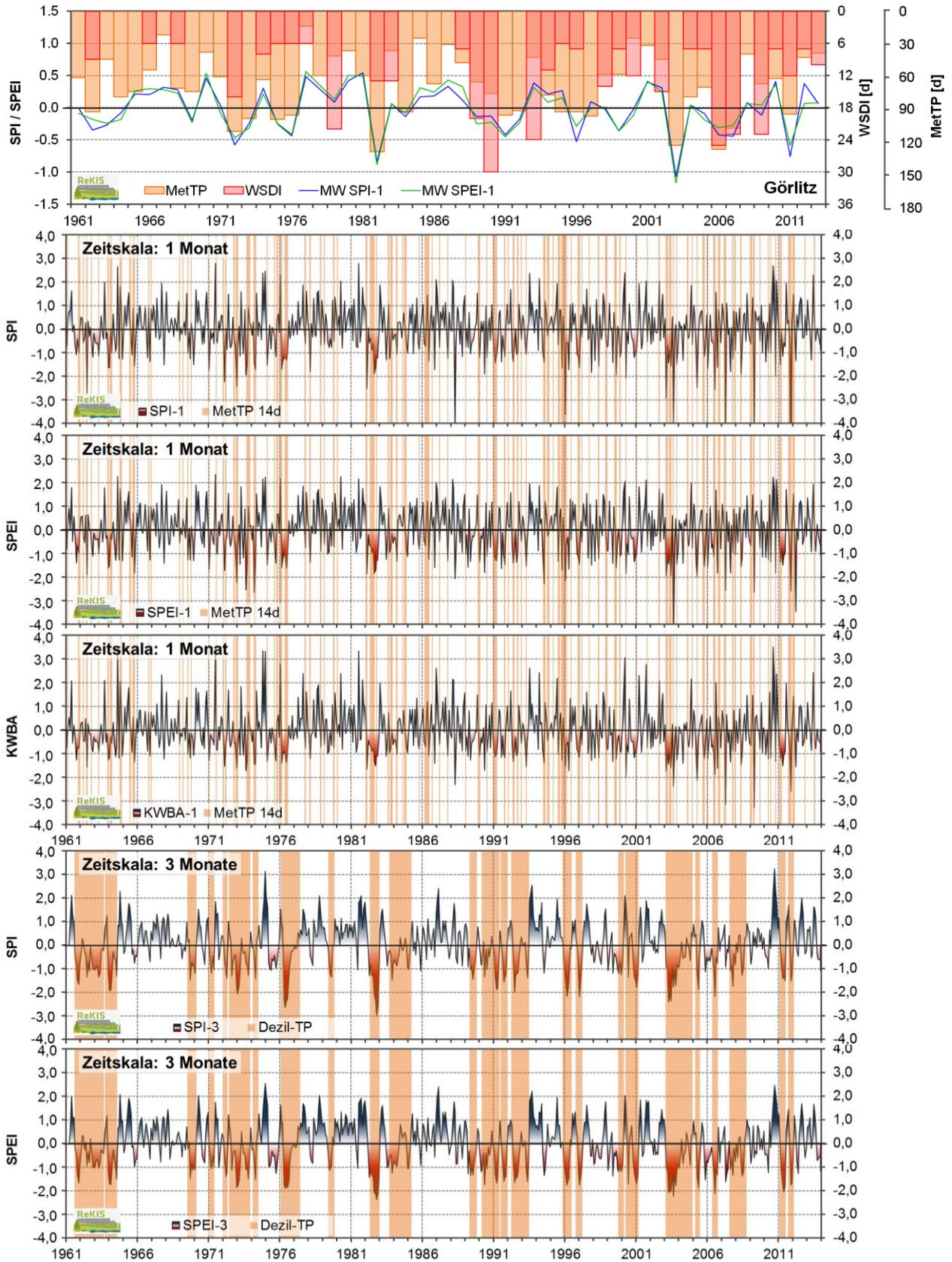
Alle 16 Tage werden die neuen Bilder hochgeladen, wo der Nutzer die Vegetationsbedingungen anhand der Indizes NDVI, NDVI-Abweichung vom Langzeitmittel und VCI für drei verschiedene Ebenen (Gesamtregion, Provinz oder Pixel) untersuchen kann. Auf der Pixel- und Distriktebene können auch Zeitreihenanalysen durchgeführt werden, um die zeitliche Entwicklung trockener oder nasser Bedingungen verfolgen zu können.

In Zukunft soll der SADM auch meteorologische und landwirtschaftliche Informationen einbeziehen, weil die reine Nutzung von Fernerkundungsdaten für klare Vorhersagen zur Dürreentwicklung unzureichend ist. Durch natürliche Oberflächenfaktoren wie Topografie und Böden sowie landwirtschaftliche Managementpraktiken können die Informationen der Fernerkundungs-Dürreindizes verzerrt sein.

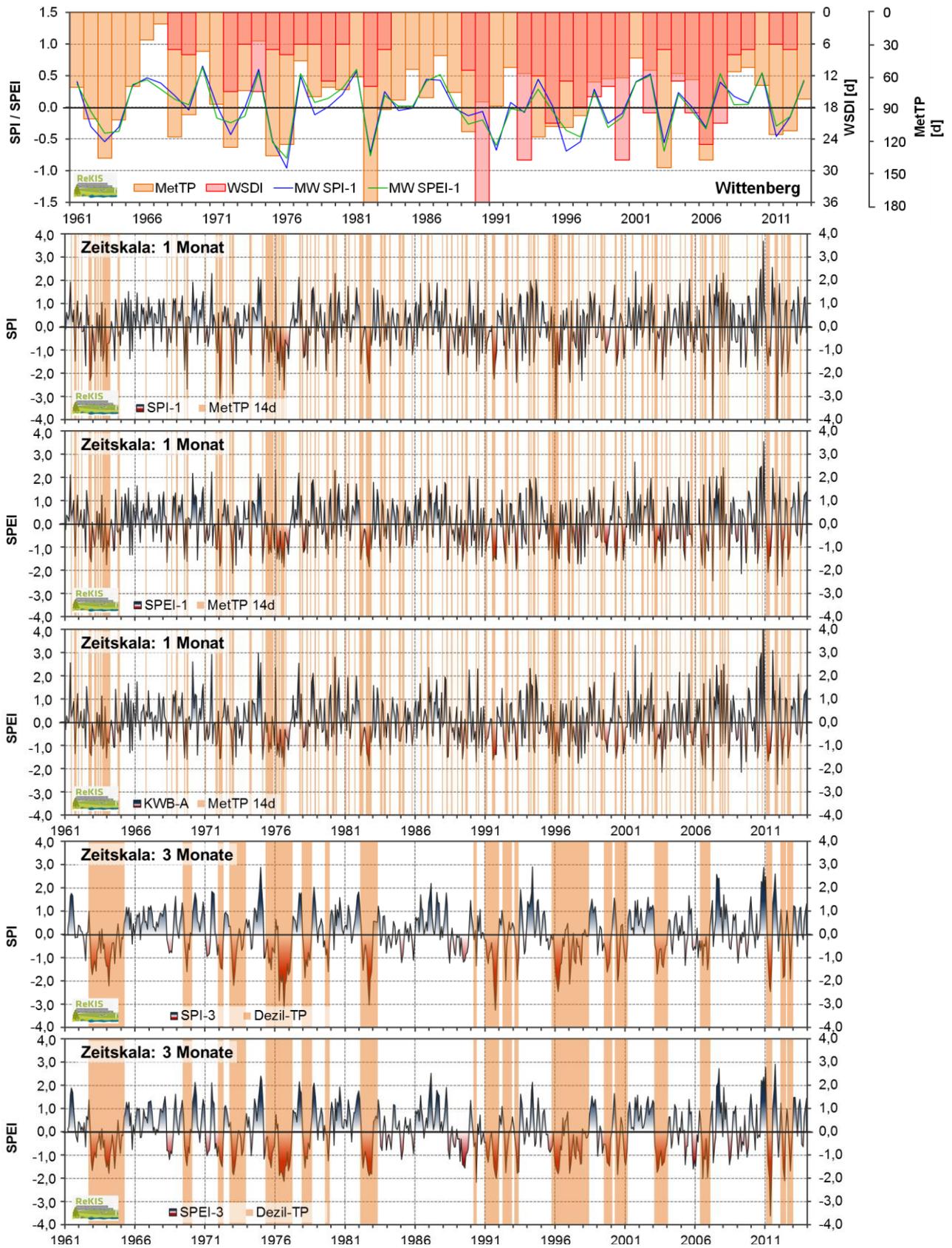
Anlage 7: Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes für die auf Jahresbasis akkumulierten Werte (oberste Teilabbildung) sowie die Zeitskalen 1 und 3 Monate

Anlage 7-1: Station Görlitz	195
Anlage 7-2: Station Wittenberg.....	196
Anlage 7-3: Station Chemnitz.....	197
Anlage 7-4: Station Fichtelberg	198

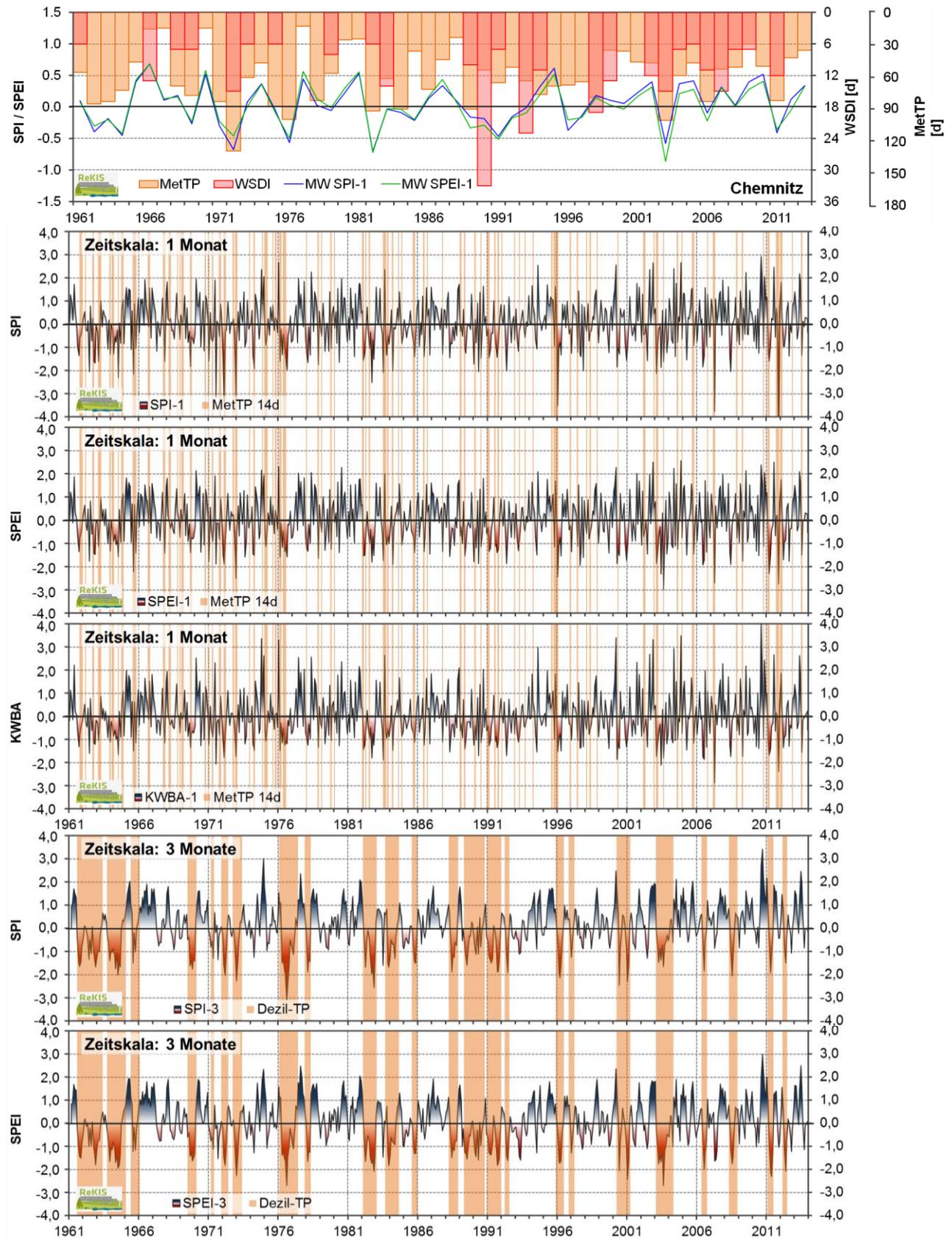
Anlage 7-1: Station Görlitz



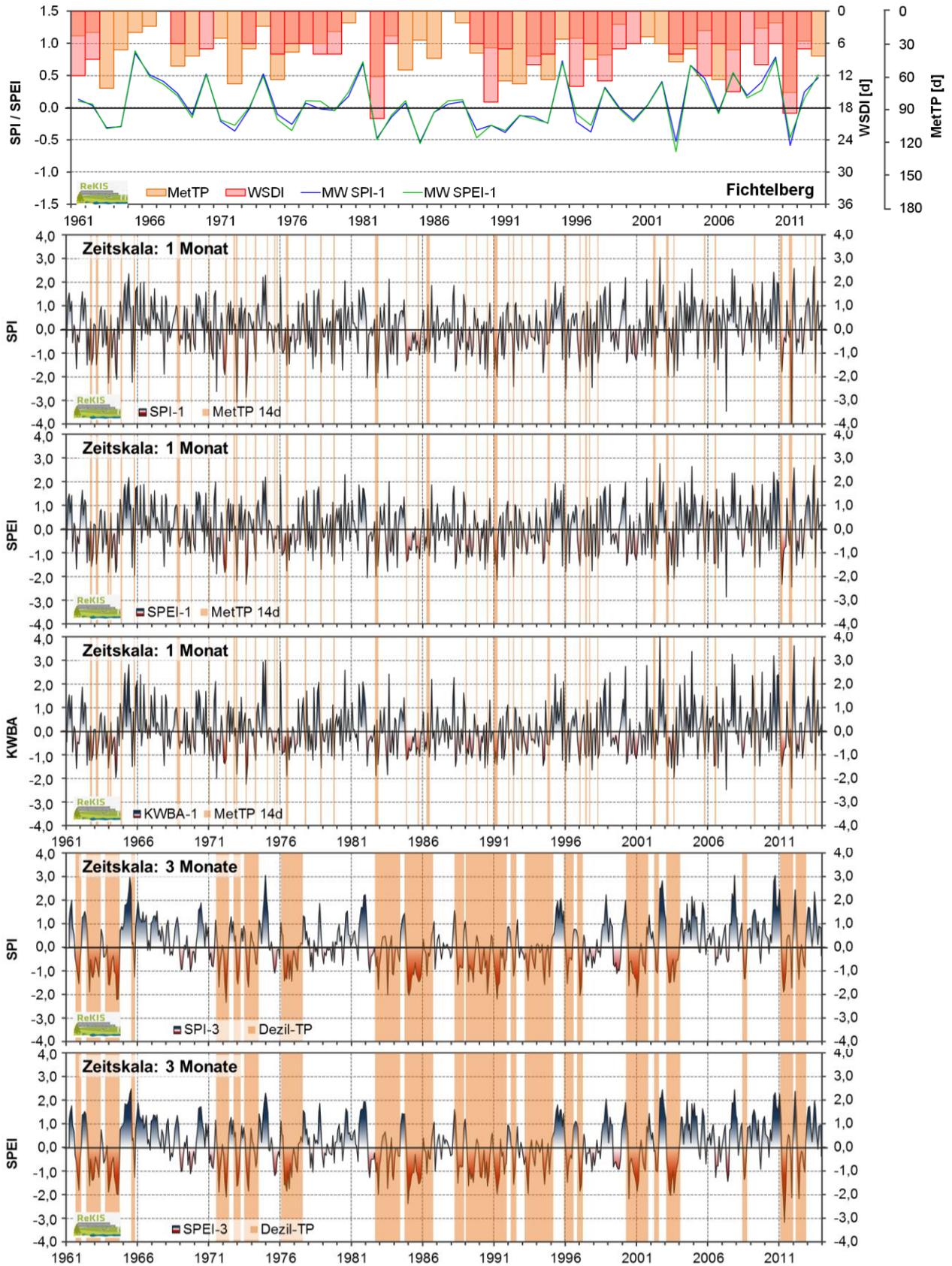
Anlage 7-2: Station Wittenberg



Anlage 7-3: Station Chemnitz

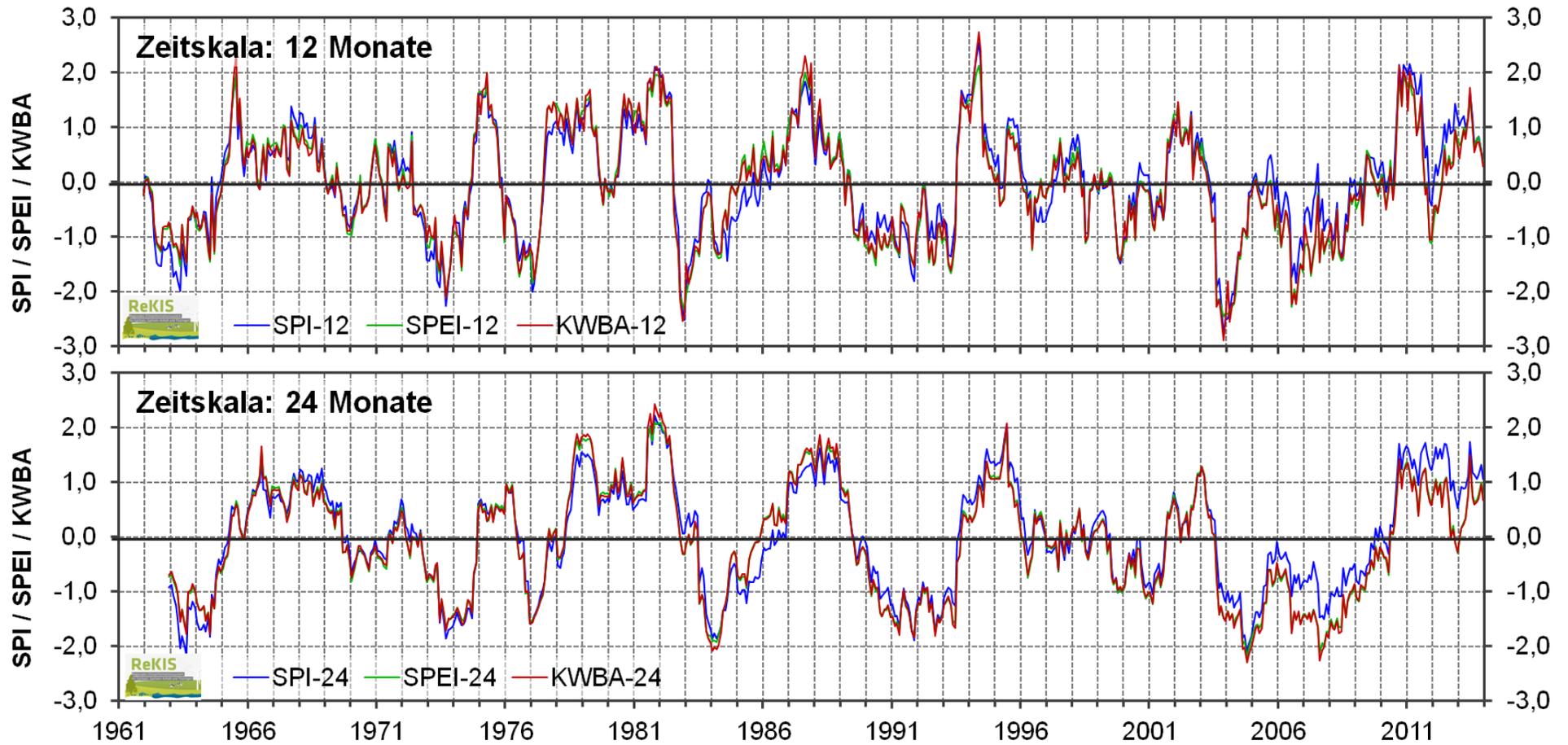


Anlage 7-4: Station Fichtelberg

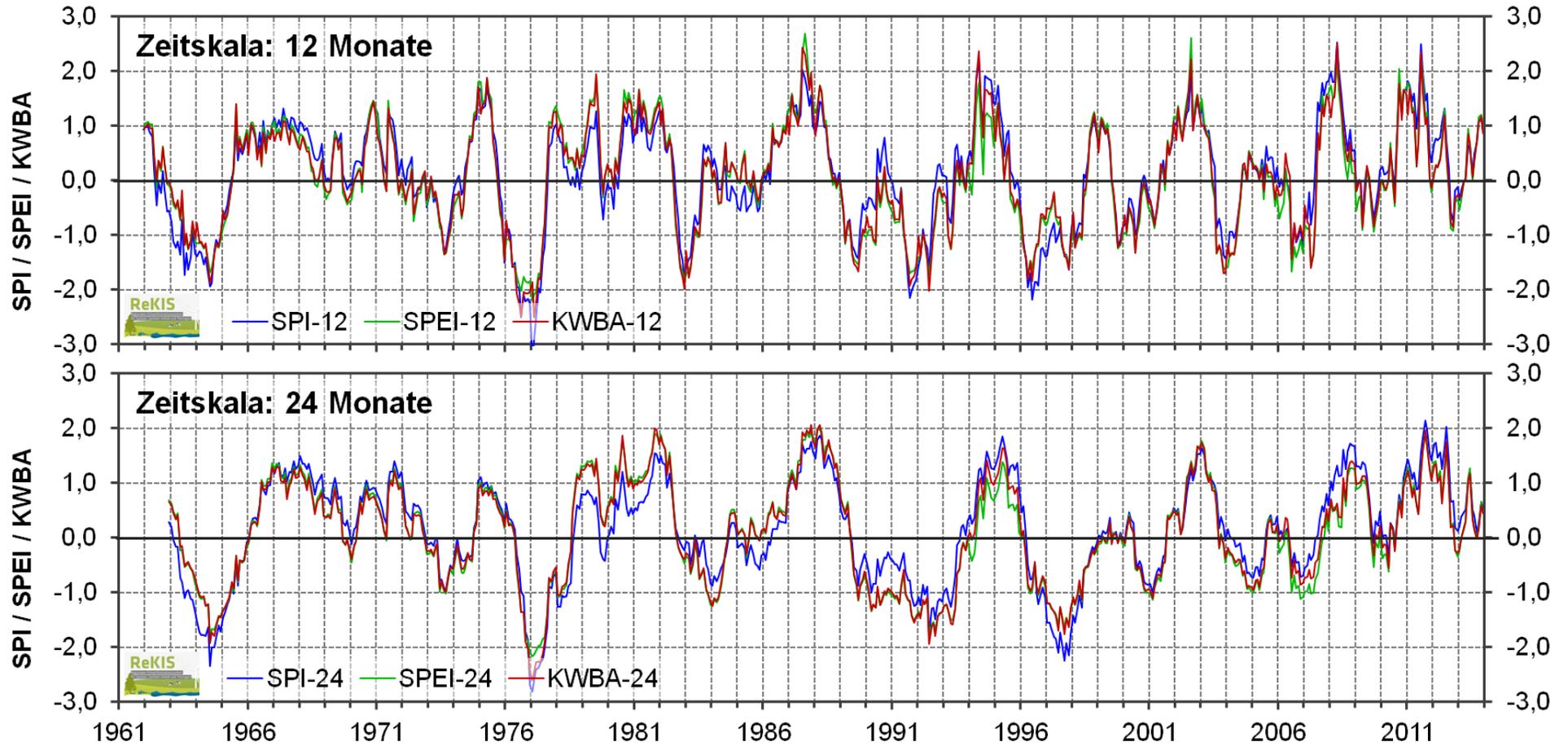


Anlage 8: Zeitlicher Verlauf verschiedener Dürreindizes für die Zeitskalen 12 und 24 Monate

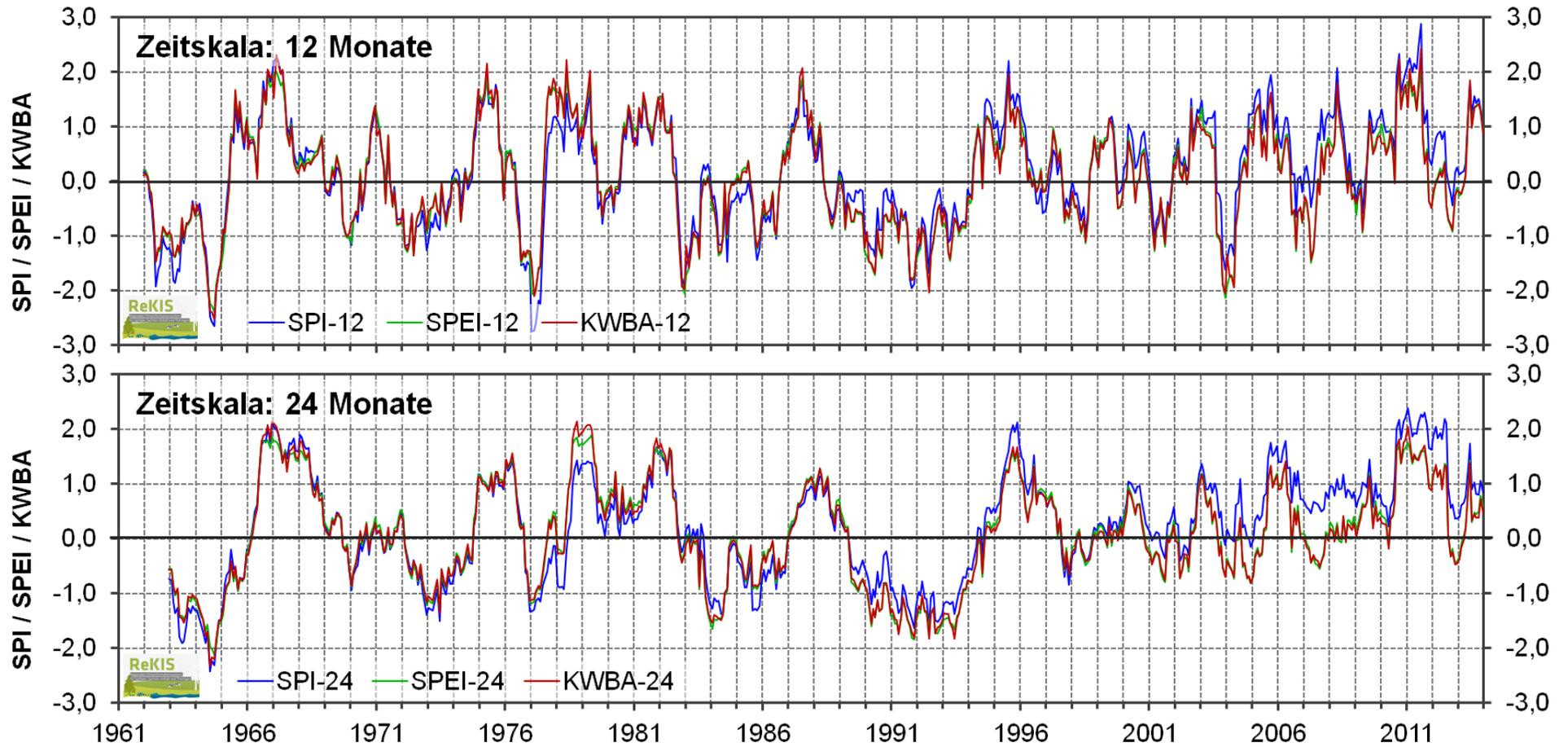
Anlage 8-1: Station Görlitz



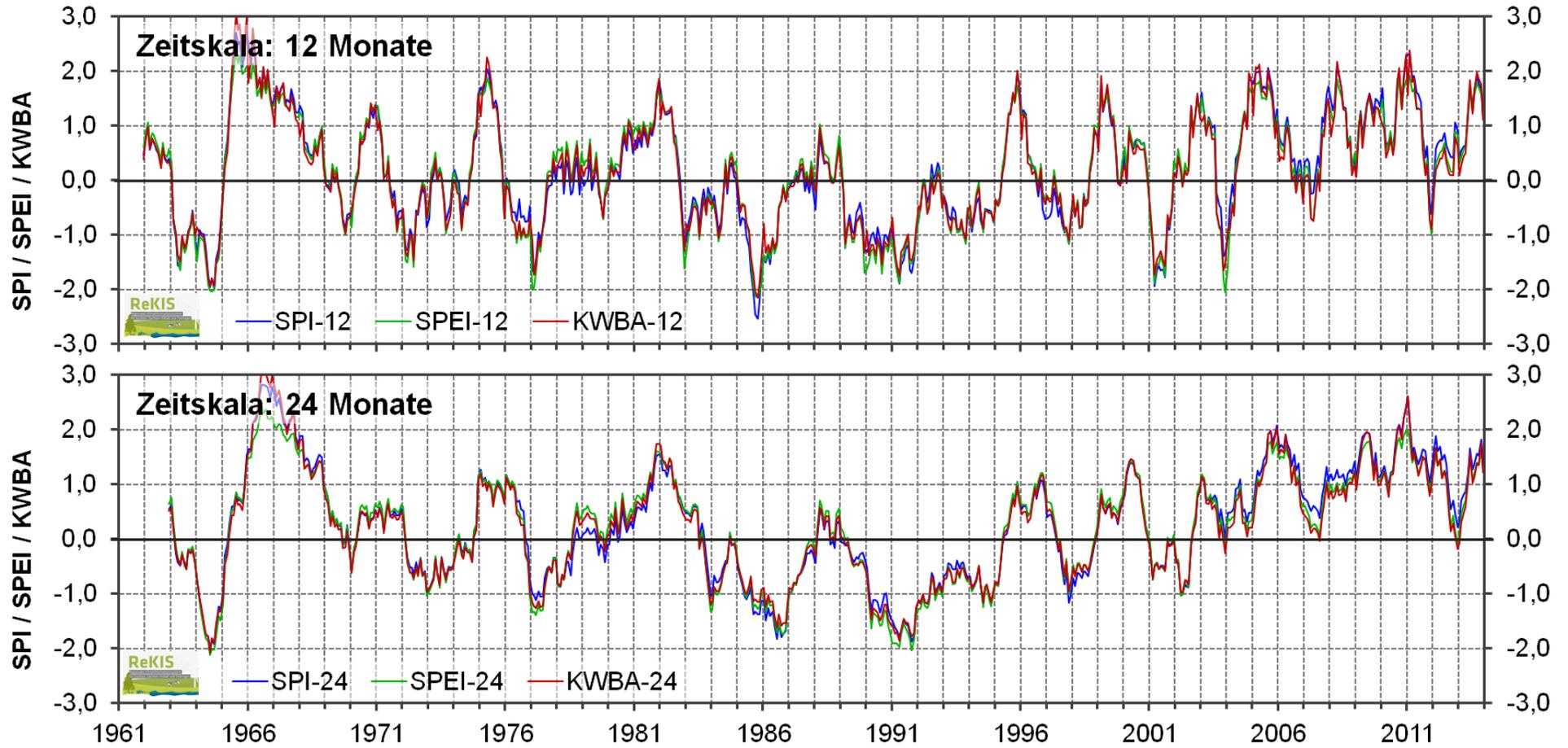
Anlage 8-2: Station Wittenberg



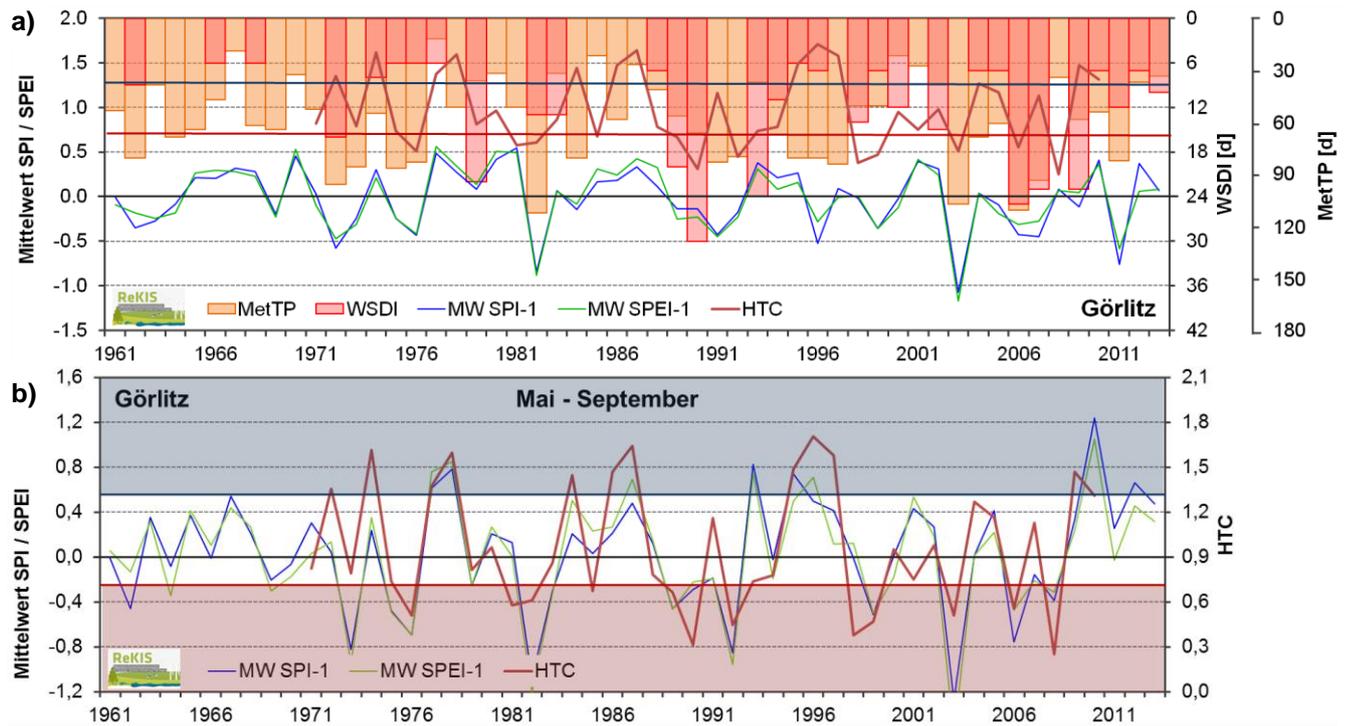
Anlage 8-3: Station Chemnitz



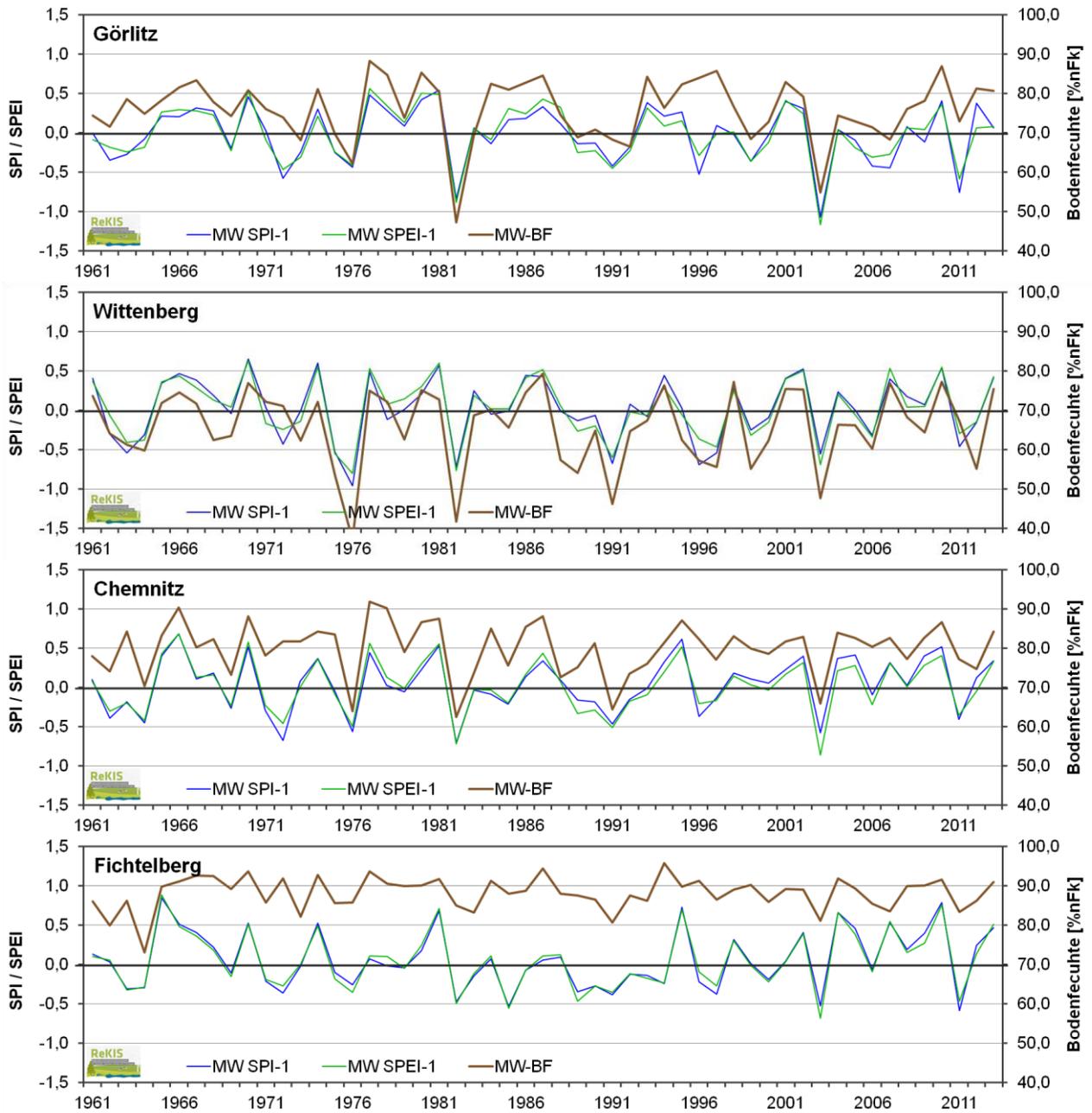
Anlage 8-4: Station Fichtelberg



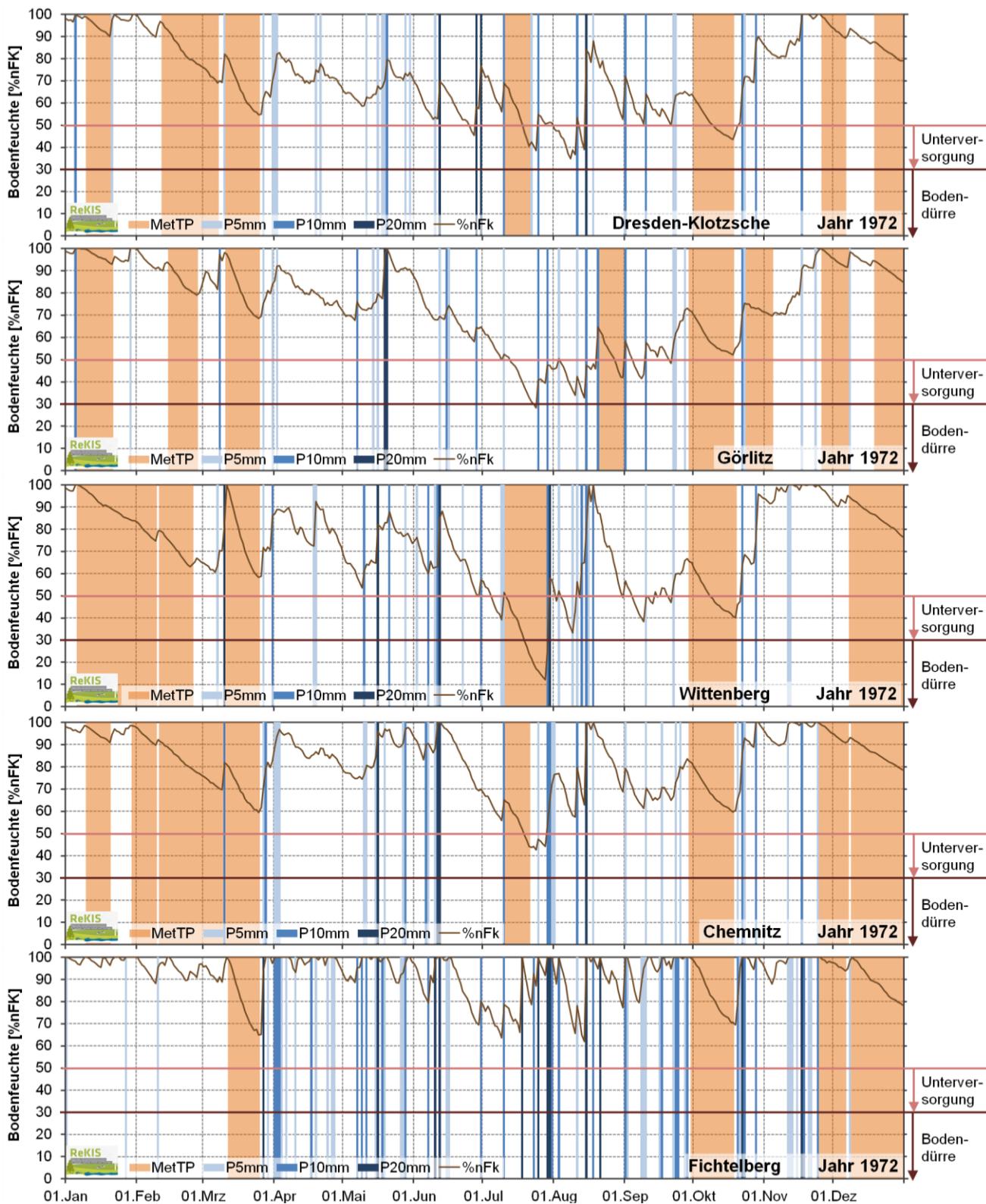
Anlage 9: Zeitlicher Verlauf der a) Jahreswerte (außer HTC) von metTP, WSDI, SPI-1, SPEI-1 und HTC und b) der SPI-1, SPEI-1 und HTC-Werte für den Zeitraum Mai bis Sept.; Station Görlitz



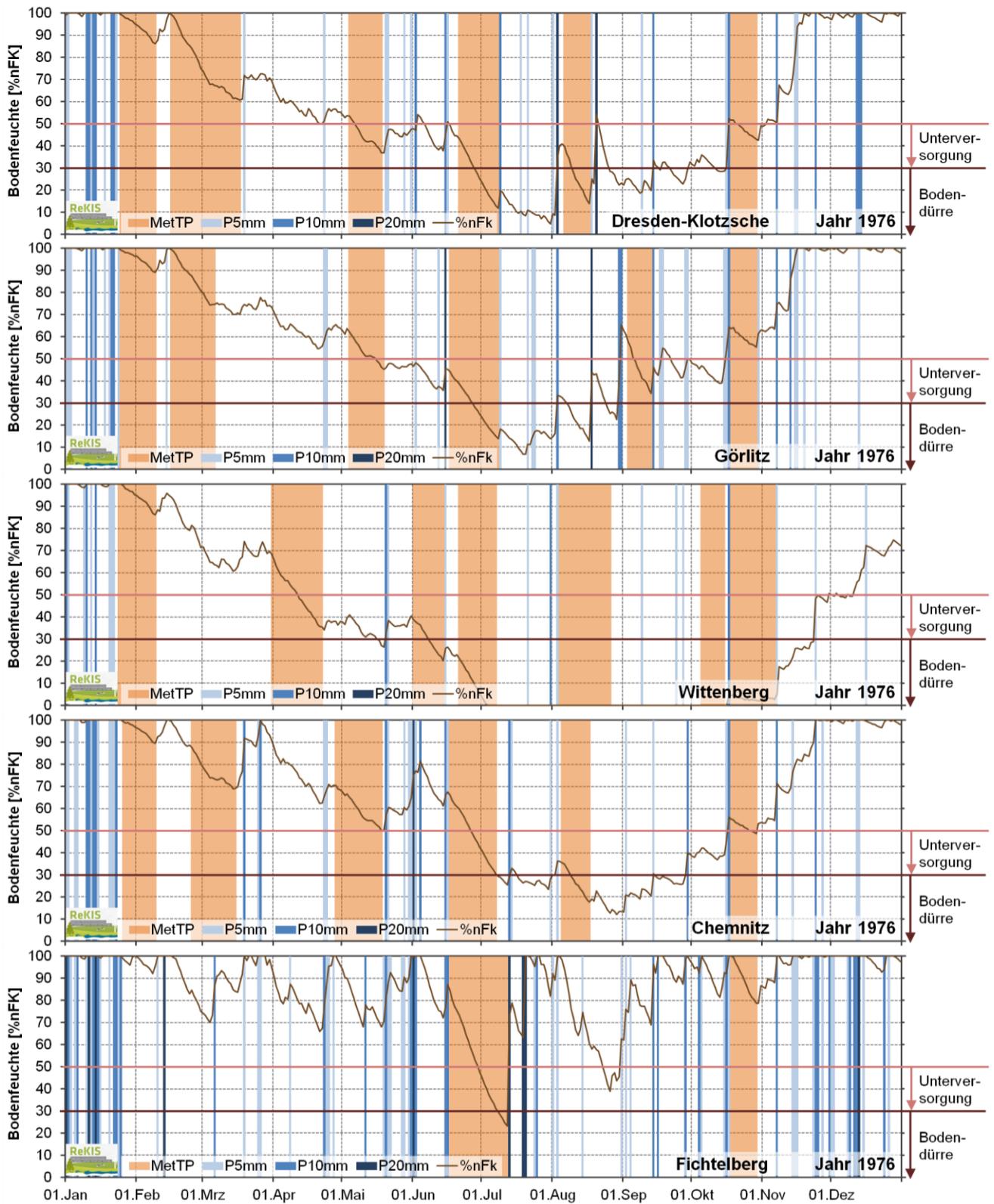
Anlage 10: Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte (aus Monats- bzw. Tageswerten gemittelte Werte) von SPI-1 und SPEI-1 sowie der mittels METVER für die Ackerfrucht Winterweizen modellierte Bodenfeuchte (BF in % der nutzbaren Feldkapazität nFk) an vier Standorten im Zeitraum 1961–2013



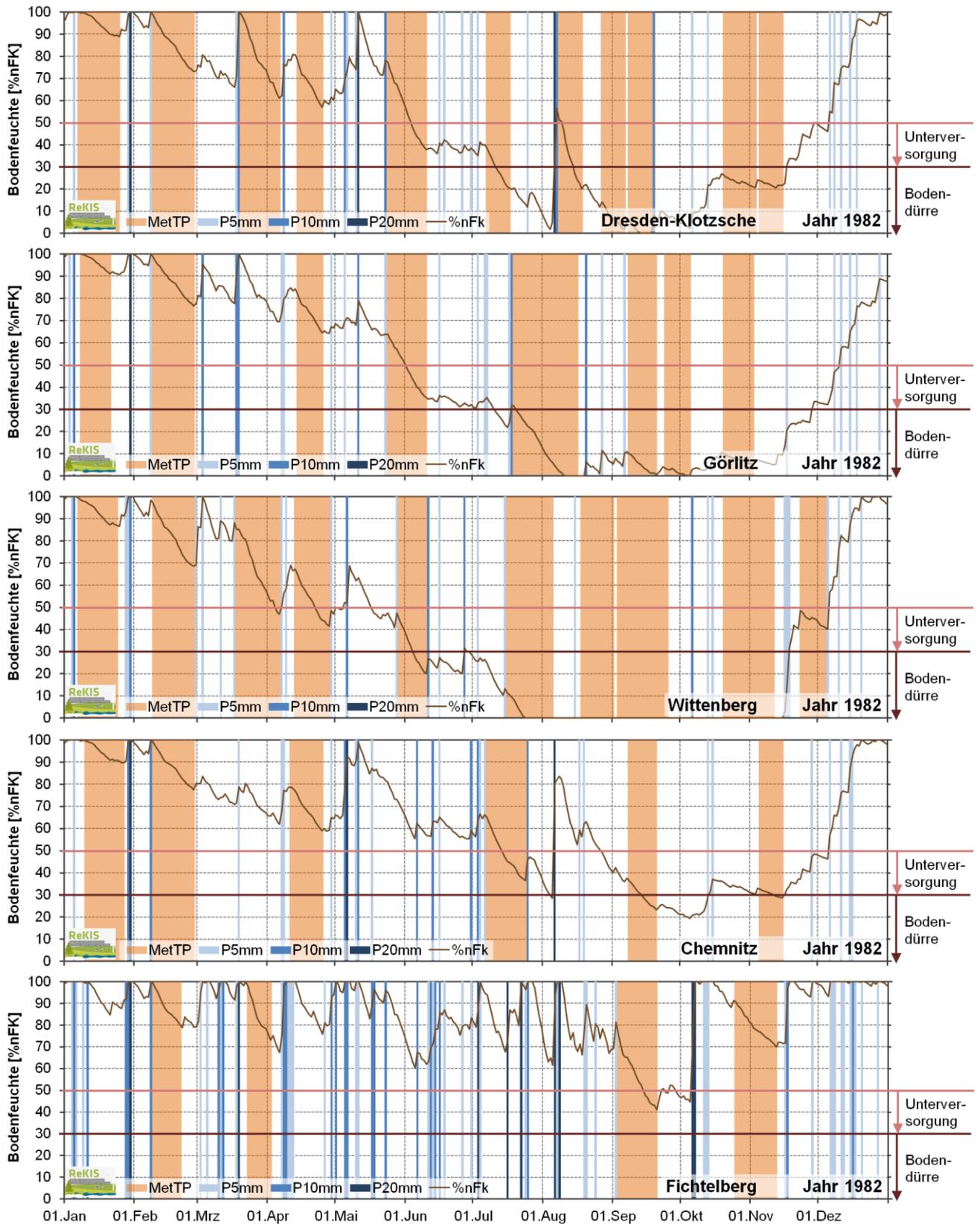
Anlage 11: Vergleich des Jahresgangs der mittels METVER (Winterweizen) modellierten Bodenfeuchte (in %nFk) an fünf Standorten mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) sowie Niederschlagstagen ($\geq 5/10/20$ mm = P5/10/20mm) drei ausgewählter Trockenjahre (1972)



Anlage 11 (Fortsetzung): Vergleich des Jahresgangs der mittels METVER (Winterweizen) modellierten Bodenfeuchte (in %nFk) an fünf Standorten mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) sowie Niederschlagstagen ($\geq 5/10/20$ mm = P5/10/20mm) drei ausgewählte Trockenjahre (1976)



Anlage 11 (Fortsetzung): Vergleich des Jahresgangs der mittels METVER (Winterweizen) modellierten Bodenfeuchte (in %nFk) an fünf Standorten mit dem Auftreten von meteorologischen Trockenperioden (metTP) sowie Niederschlagstagen ($\geq 5/10/20$ mm = P5/10/20mm) drei ausgewählte Trockenjahre (1982)



Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Prof. Dr. Christian Bernhofer, Dr. Stephanie Hänsel, Andrea Schaller, Thomas Pluntke
TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften
Professur für Meteorologie
PF 1117, 01735 Tharandt
Telefon: +49 351 463-31340
Telefax: +49 35203 38-31302
E-Mail: meteorologie@tu-dresden.de

Redaktion:

Dr. Johannes Franke
LfULG; Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5116
Telefax: +49 351 2612-5199
E-Mail: johannes.franke@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:

15.04.2015

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.