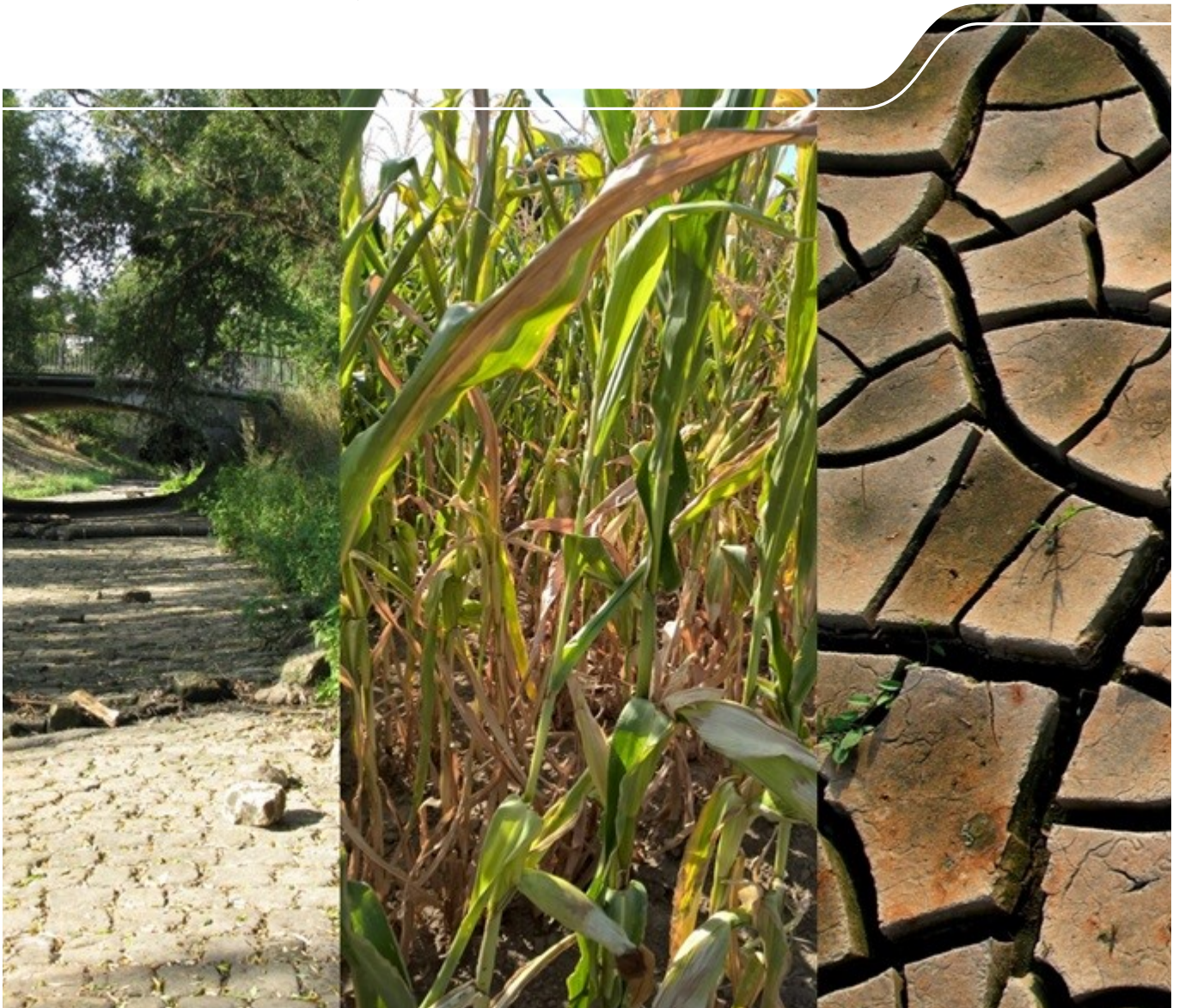


Erfassung und Abschätzung von Trockenheitsmerkmalen in Sachsen

Schriftenreihe, Heft 1/2021



Erarbeitung von Optionen
zur Erfassung und Abschätzung der
zeitlichen Entwicklung
von Trockenheitsmerkmalen
für sich ändernde Klimabedingungen
im Freistaat Sachsen

Thomas Pluntke, Dr. Rico Kronenberg, Dr. Stephanie Hänsel, Dominic Rumpf, Dr. Frank Zimmermann,
Prof. Dr. Jörg Matschullat, Prof. Dr. Christian Bernhofer

Inhalt

1	Einleitung und Zielstellung	9
2	Begriffe Trockenheit und Dürre	11
3	Daten	13
3.1	Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes	13
3.2	Bodenfeuchte	13
3.3	Vegetationsindex	15
3.4	Impaktdaten.....	16
4	Methoden	19
4.1	Allgemeine Festlegungen	19
4.2	Meteorologische Trockenindizes	19
4.2.1	Standardisierter Niederschlagsindex SPI	19
4.2.2	Standardisierter Niederschlags-Verdunstungsindex SPEI	20
4.2.3	Reconnaissance-Dürreindex RDI	21
4.2.4	Auswahl der besten Verteilungsfunktion	21
4.2.5	Wahl der Referenzperiode	24
4.3	Hydrologische Trockenindizes.....	24
4.4	Bodentrockenheit.....	24
4.5	Validierung der Trockenindizes	25
4.5.1	Validierung der einzelnen Trockenindizes.....	25
4.5.2	Validierung von Kombinationen von Trockenindizes	27
4.6	Einfluss von Starkniederschlag auf Trockenheitsindizes	28
5	Ergebnisse	29
5.1	Indizes meteorologischer Trockenheit.....	29
5.1.1	Mittlere Indexwerte	29
5.1.2	Häufigkeit, Dauer, und Schweregrad von Trockenperioden.....	34
5.1.3	Räumliche Ausdehnung von Trockenperioden	37
5.1.4	Vergleich Reconnaissance-Dürreindex zu Standardisierter Niederschlagsindex und Standardisierter Niederschlags-Verdunstungsindex.....	39
5.2	Impaktrelevanz des Standardisierten Niederschlagsindex und des Standardisierten Niederschlags-Verdunstungsindex	41
5.2.1	Sektor Landwirtschaft.....	41
5.2.2	Sektor Forstwirtschaft.....	43
5.2.3	Sektor Wasserwirtschaft	46
5.3	Index der Bodentrockenheit.....	51
5.3.1	Häufigkeit der fünf Bodenfeuchteklassen.....	53
5.3.2	Häufigkeit von Bodendürren längerer Andauer	58
5.4	Validierung meteorologischer Indizes.....	62
5.4.1	Validierung einzelner meteorologischer Indizes mit dem NDVI.....	62
5.4.2	Validierung einzelner meteorologischer Indizes mit dem SMI.....	68
5.4.3	Kombination von meteorologischen Indizes	71
5.5	Einfluss von Starkniederschlag auf Trockenheitsindizes	81
5.6	Darstellung der Ergebnisse	90
6	Konzept zur Erfassung und Analyse von Trockenheitssituationen	91
6.1	Datengrundlage	91
6.2	Trockenheitsmerkmale	94
7	Zusammenfassung	100
8	Ausblick	104
9	Referenzen	105
Anhang	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Thermopluviogramm für Sachsen. Anomalien des Gebietsmittels der Jahresmitteltemperatur und des Jahresniederschlags.....	9
Abbildung 2: Zeitliche Abfolge eine Dürre (aus Bernhofer et al. 2015b)	11
Abbildung 3: Mittlere monatliche Bodenfeuchte (Anteil vom Sättigungswassergehalt) der Periode 1950-2010. Mittel eines Modellensembles zur Berücksichtigung der Unsicherheiten der Parameterschätzung und der Niederschlagsinterpolation (aus Samaniego et al. 2013).	15
Abbildung 4: Karte der analysierten Einzugsgebiete inklusive der verwendeten Pegel.	18
Abbildung 5: Lage der analysierten Grundwassermessstellen.	18
Abbildung 6: Räumliches Verteilungsmuster der optimalen Verteilungsfunktion für die Berechnung des SPI auf unterschiedlichen Zeitskalen.	22
Abbildung 7: Wie Abbildung 6, jedoch für den SPEI.	23
Abbildung 8: Definitionen für Beginn und Ende von Dürreperioden der Klasse „Vorwarnstufe“ und „Moderate Dürre“, exemplarisch für eine 4 x 4 km Gitterzelle	25
Abbildung 9: Landnutzung und Flächen (graue Rechtecke), an denen der NDVI aus den MODIS Daten und die SMI Daten aus dem Deutschlandraaster extrahiert wurden.....	26
Abbildung 10: Zeitreihen des SPI-Flächenmittels für Sachsen auf unterschiedlichen Zeitskalen.	30
Abbildung 11: Zeitreihen des SPEI-Flächenmittels für Sachsen auf unterschiedlichen Zeitskalen.	31
Abbildung 12: Karten der Differenz von SPEI-6 und SPI-6 für die Halbjahre im Vergleich der Zeitscheiben 1961–1990 (links) und 1991–2014 (rechts).	32
Abbildung 13: Differenzkarten (1991–2014 vs. 1961–1990) des SPI (oben) und SPEI (unten) für ausgewählte Jahreszeiten	33
Abbildung 14: Andauer von Trockenperioden (Sachsenmittel) basierend auf dem SPI sowie dem SPEI unter Einbeziehung dreier Schätzer der potentiellen Evapotranspiration für sechs verschiedene Zeitskalen (1, 3, 6, 9, 12 und 24 Monate). Moderate Trockenperioden (SPEI < 0 und mind. einmal im Verlauf der Trockenperioden <-1) sind orange und starke Trockenphasen (SPEI dauerhaft < -1,5) sind rot gekennzeichnet.....	34
Abbildung 15: Karten der mittleren Intensität (Schwere) von moderaten SPEI-Trockenperioden (SPEI < 0 und mindestens einmal im Verlauf der Trockenperiode < -1,0) in den Zeiträumen 1961–1990 (links) und 1991–2014 (rechts).	35
Abbildung 16: Karten der Häufigkeit von schwerwiegender bis extreme Trockenheit (Unterschreitungshäufigkeit eines SPEI-Wertes von -1,5) für das Jahr (SPEI-12 für Dezember) und die Halbjahre (SPEI-6 für März und September) für die Zeitscheiben 1961–1990 (links) und 1991–2014 (rechts).	36
Abbildung 17: Zeitreihen des als moderat (SPEI < 1,0; hellrosa), stark (SPEI < 1,5; rosa) und extrem trocken (SPEI < 2,0; dunkelrot) klassifizierten Flächenanteils von Sachsen auf verschiedenen Zeitskalen; Referenzperiode: 1961–2000; Ansatz Potentielle Verdunstung: Grasreferenzverdunstung.....	38
Abbildung 18: Zeitreihen des als moderat (Index < 1,0; hellrosa), stark (Index < 1,5; rosa) und extrem trocken (Index < 2,0; dunkelrot) trocken klassifizierten Flächenanteils von Sachsen mittels SPI für die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden (jeweils Wirkungszeitskala von drei Monaten); Referenzperiode: 1961–2000.....	39
Abbildung 19: Vergleich der Indizes SPI, SPEI und RDI verschiedener Zeitskalen für Chemnitz in der Periode 2013–2018.	40
Abbildung 20: Gebietsniederschläge und landwirtschaftliche Erträge	42
Abbildung 21: Gebietsniederschläge und Schäden durch Waldbrand und Dürre.....	44
Abbildung 22: Niederschläge und von Schädlingen befallene Forstbestände in Sachsen	46
Abbildung 23: Vergleich des zeitlichen Auftretens von Trockenperioden (gemittelt über ausgewählte EZG) basierend auf dem SPI, zwei SPEI-Formen.....	48

Abbildung 24: Korrelation des SSI 1 mit dem SPEI auf sechs verschiedenen Zeitskalen und für Verschiebungen zwischen den beiden Zeitreihen zwischen -24 bis +24 Monaten dargestellt für drei unterschiedlich große EZG im Mulde-Einzugsgebiet; Zeitraum: 1961–2010.....	49
Abbildung 25: Korrelation (Spearman-Rangkorrelationskoeffizient) zwischen dem standardisierten Grundwasserindex (SGI) auf der Zeitskala von einem Monat mit dem SPEI auf verschiedenen Wirkungszeitskalen (1 bis 48 Monate) und für verschiedene zeitliche Verzögerungen (lag) zwischen den Datenreihen; Zeitraum: 1961–2014.....	50
Abbildung 26: Exemplarische Darstellung der SMI über Gesamtperiode für eine Rasterzelle.....	51
Abbildung 27: Andauer von Bodentrockenheit verschiedener Andauern (1–24 Monate) für fünf Bodenfeuchteindex-Klassen und zwei Vergleichszeiträume.....	52
Abbildung 28: Mittlere Häufigkeit der fünf SMI-Dürreklassen in 10 Jahren; Vergleich 1961–1990 mit 1991–2017.....	54
Abbildung 29: Häufigkeit der SMI-Klasse „Vorwarnstufe“ in den Dekaden von 1951–2017.....	55
Abbildung 30: Häufigkeit der SMI-Klasse „Vorwarnstufe“ im Gesamtboden in den Jahreszeiten der Perioden 1961–1990 und 1991–2017.....	56
Abbildung 31: Häufigkeit der SMI-Klasse „Vorwarnstufe“ im Oberboden in den Jahreszeiten der Perioden 1961–1990 und 1991–2017.....	57
Abbildung 32: Häufigkeit 3-monatiger Ereignisse der 5 Dürreklassen im Gesamtboden in den Perioden 1961–1990 (links) und 1991–2017 (rechts).....	59
Abbildung 33: Anomalien 3-monatiger Ereignisse „Extremer Dürre“ im Gesamtboden in den Dekaden im Vergleich zu 1961–1990.....	60
Abbildung 34: Anomalien 12-monatiger Ereignisse „Moderater Dürre“ im Gesamtboden in den Dekaden im Vergleich zu 1961–1990.....	61
Abbildung 35: NDVI verschiedener Landnutzungen in Sachsen.....	62
Abbildung 36: Jahregänge des NDVI für Regionen in der Nähe der Klimastationen für den Zeitraum 2003–2018.....	64
Abbildung 37: Korrelation des über die Wachstumssaison gemittelten NDVI-Wertes mit den meteorologischen Indizes (SPI, SPEI und RDI) verschiedener Aggregationszeiten für sechs Klimastationen.....	67
Abbildung 38: Jahregänge des Bodenfeuchteindex SMI für die untersuchten Standorte. Ein feuchtes Jahr (2010) und zwei trockene (1982, 2003) sind farbig gekennzeichnet.....	68
Abbildung 39: Korrelationen des über die Wachstumssaison gemittelten SMI des Gesamtbodens (links) und Oberbodens (rechts) mit den meteorologischen Indizes (SPI, SPEI, RDI) verschiedener Aggregationszeiten (von 6 bis 24 Monaten) für sechs Klimastationen.....	70
Abbildung 40: Maximale Korrelation zwischen dem SMI (links Ober- und rechts Gesamtboden) und dem SPEI verschiedener Aggregierungsstufen.....	75
Abbildung 41: Bestimmtheitsmaß der Multiplen Linearen Regressionen für den Oberboden (links) und Gesamtboden, für den Gesamten Datensatz und unter Trockenbedingungen.....	76
Abbildung 42: Bewertungsmaße für die Abbildung von Trockenheit im Oberboden ($SMI_{\text{Ober}} < 0,3$).....	77
Abbildung 43: Bewertungsmaße für die Abbildung von Trockenheit im Gesamtboden ($SMI_{\text{Ges}} < 0,3$).....	77
Abbildung 44: Kling-Gupta-Effizienz des MLR-Modells im Vergleich zu den SMI-Werten des Dürremonitors für die Abbildung der Andauer und Intensität von Trockenperioden.....	78
Abbildung 45: Vergleich von Dürreandauer und Intensität der modellierten SMI-Werte des Gesamtbodens (MLR) und der Werte des Dürremonitors für Sachsen.....	79
Abbildung 46: Vergleich von Dürreandauer und Intensität der modellierten SMI-Werte des Oberbodens (MLR) und der Werte des Dürremonitors für Sachsen.....	80
Abbildung 47: Zusammenhang von SPI und SPEI verschiedener zeitlicher Aggregierungen mit SMI-Oberboden für die Station Plauen unter Berücksichtigung des Starkniederschlagsanteils (95. Perzentil) am Gesamtniederschlag.....	83

Abbildung 48: Zusammenhang zwischen SPEI2 und dem SMI-Oberboden für sechs Stationen (Details siehe Abbildung 47)	84
Abbildung 49: Zusammenhang zwischen SPEI2 und dem SMI-Oberboden für sechs Stationen, unter Berücksichtigung des Starkniederschlagsanteils (95. Perzentil) am Gesamtniederschlag.	85
Abbildung 50: Zusammenhang zwischen SPEI2 und dem SMI-Oberboden für Plauen (oben) und Dresden (unten), unter Berücksichtigung des Starkniederschlagsanteils (95. Perzentil) am Gesamtniederschlag des Monats.....	86
Abbildung 51: Vergleich von SPI und SPEI mit dem Bodenfeuchteindex des Ober- und Gesamtbodens für Chemnitz, unter Berücksichtigung des Starkniederschlagsanteils (Schwellwert ist das 95. Perzentil des Monats). Details zur vertikalen braunen Linie im Text.....	87
Abbildung 52: Beziehung zwischen ereignisbasiertem Niederschlag und modellierter Zunahme des Bodenwassergehaltes für ein Teileinzugsgebiet der Würschnitz (bei Chemnitz) unter Trockenbedingungen (SMI<0,3I).....	89
Abbildung 53: DWD-Ensemble 2018 mit zurückgezogenen (durchgestrichen) und empfohlenen Klimaprojektionen.....	93
Abbildung 54: Zeitreihe des SPEI verschiedener Aggregierungsstufen, Sachsenmittel.....	95
Abbildung 55: Zeitreihe der flächenhaften Ausprägung von SPEI Trockenperioden verschiedener Aggregierungsstufen und verschiedener Schweregrade, Sachsenmittel.....	96
Abbildung 56: Kumulative Klimatische Wasserbilanz einzelner Trockenjahre (2003 und 2018) um Vergleich zu Jahren der Referenzperioden 1961–1990 und 1991–2015.....	97
Abbildung 57: Bodenfeuchteindex SMI ermittelt mit einer Multiplen Linearen Regression MLR im Vergleich zu den Werten des Dürremonitors; Beispielhaft für zwei Monate des Jahres 2018, getrennt für Ober- und Gesamtboden	98
Abbildung 58: Zeitscheibenvergleich 1991–2014 vs. 1961–1990 für den SPEI für die VP I und II.....	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Analysierte Stationen und Güte der Lückenfüllung, Ergebnis einer Kreuzvalidierung für den Zeitraum 1951–2018 (R^2 : Bestimmtheitsmaß und RMSE: Root Mean Square Error)	13
Tabelle 2:	Klasseneinteilung des Bodenfeuchteindex SMI (ZINK et al. 2016; Vergleichszeichen korrigiert).....	14
Tabelle 3:	Zusammenhänge zwischen den Dürreindizes SPI und SPEI mit Auswirkungen in den Bereichen Land-, Forst- und Wasserwirtschaft anhand einiger Studien	17
Tabelle 4:	Einteilung der SPI-Werte in Feuchtezustandskategorien.....	20
Tabelle 5:	Korrelationskoeffizienten zwischen SPI verschiedener Aggregierungszeiträume (SPI-Aggreg.) und zeitlicher Verschiebungen (lag) mit dem NDVI in den Monaten der Wachstumsaison für die Station Görlitz	65
Tabelle 6:	Signifikante Korrelationen zwischen dem NDVI der Wachstumsaison und dem SPI (oben), SPEI (Mitte) und RDI (unten) an sechs Standorten. Numerisch erfasst sind, welche SPI Aggregierungsstufen (bzw. SPEI, RDI) mit welcher zeitlichen Verschiebung (in Klammern) mit dem NDVI korrelieren. Farblich kodiert ist, wie häufig die SPI Monatswerte signifikant mit dem NDVI korrelieren.	66
Tabelle 7:	Signifikante Korrelationen zwischen dem Bodenfeuchteindex SMI (Gesamt- bzw. Oberboden) der Wachstumsaison (Mai-Oktober) und den meteorologischen Indizes (SPI, SPEI, RDI) an 6 Stationen. Numerisch erfasst sind, welches Aggregierungsniveau der Indizes mit welcher zeitlichen Verschiebung (in Klammern) signifikant mit dem SMI korrelieren. Farblich kodiert ist, wie häufig die Index-Monatswerte mit dem SMI korrelieren.	69
Tabelle 8:	Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen dem SMI des Oberbodens mit einzelnen meteorologischen Indizes sowie Kombinationen dieser für verschiedene Aggregationszeiten der Indizes. Werte verwendet unterhalb des SMI Schwellwertes 0,3. Fett markiert ist der jeweils höchste Korrelationskoeffizient, unterstrichen die Fälle, in denen eine Mittelung zu einer Verbesserung führt (Arithmetische Mittelung AM, gewichtete Mittelung GM, Multiple Lineare Regression MLR)	71
Tabelle 9:	wie Tabelle 8, jedoch für Gesamtboden.....	72
Tabelle 10:	Bestimmtheitsmaß (R^2) der automatischen (<i>auto</i>) und der manuellen (<i>manual</i>) Regressionsanalyse für den SMI des Gesamtbodens für verschiedene Schwellwerte des SMI, Stationen und Halbjahre. Fett markiert sind die maximalen Bestimmtheitsmaße.	73
Tabelle 11:	wie Tabelle 10, jedoch für den Oberboden	74
Tabelle 12:	Bestimmtheitsmaße der Automatischen Multiplen Regression (<i>auto</i>) und der Regression der drei Prädiktoren vorgegeben wurden (<i>manuell</i>). Ergebnisse der einzelnen Monate von Mai bis Oktober, eines Pools aller Werte (5-10) und des Mittelwertes der Wachstumsperiode (WP).....	75
Tabelle 13:	Statistische Kennzahlen der zeitlichen Analyse der drei Mittelungsansätze (vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46) für den Gesamt- und den Oberboden: Mittlere Häufigkeit von Trockenperioden pro Jahr, mittlere und maximale Andauer und Intensität von Trockenperioden sowie die Kling-Gupta-Effizienz (KGE) zwischen dem Modell (MLR) und dem Dürremonitor (DM)	81
Tabelle 14:	Elementspektrum, dessen Verfügbarkeit und Qualität in verschiedenen Datensätzen	92
Tabelle 15:	Erklärte Varianz (R^2) der Korrelation zwischen NDVI und SPEI bzw. SMI und SPEI. Es werden die Monate der Wachstumsaison einzeln betrachtet bzw. zusammen.....	102

Abkürzungsverzeichnis

AP	Aktuelle Periode 1991-2017
DWD	Deutscher Wetterdienst
ETP	Potentielle Evapotranspiration
ETR	Reale Evapotranspiration
EZG	Einzugsgebiet
KGE	Kling-Gupta-Effizienz
MEDOKADS	Mediterranean Extended Daily One km AVHRR Data Set
NDVI	Normalisierter Differenzen Vegetationsindex
RDI	Reconnaissance Drought Index
RP	Referenzperiode 1961-1990
SGI	Standardized Groundwater level Index
SHJ	Sommerhalbjahr
SMI	Bodenfeuchteindex (soil moisture index); Oberboden (SMI _{Ober}), Gesamtboden (SMI _{Ges})
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI	Standardized Precipitation Index
TI	Trockenindex
SSI	Standardized Streamflow Index
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
VP	Vegetationsperiode (VP I: April–Juni; VP II: Juli–September)
WHJ	Winterhalbjahr
WS	Wachstumssaison

1 Einleitung und Zielstellung

Deutschland war 2018 von einer ausgeprägten und extremen Hitze und Trockenheit betroffen, sowohl hinsichtlich der meteorologischen Randbedingungen als auch der Auswirkungen auf viele Lebensbereiche. Für Deutschland war es seit 1881 das wärmste, sonnenreichste und viertrockenste Jahr. Das Thermopluviogramm für Sachsen (Abbildung 1) zeigt die Einordnung des Jahres 2018 als das wärmste und sogar zweitrockenste Jahr seit 1881. Signifikant häufen sich die zu warmen Jahre in den letzten zwei Dekaden, wobei die Jahresniederschläge unverändert bleiben.

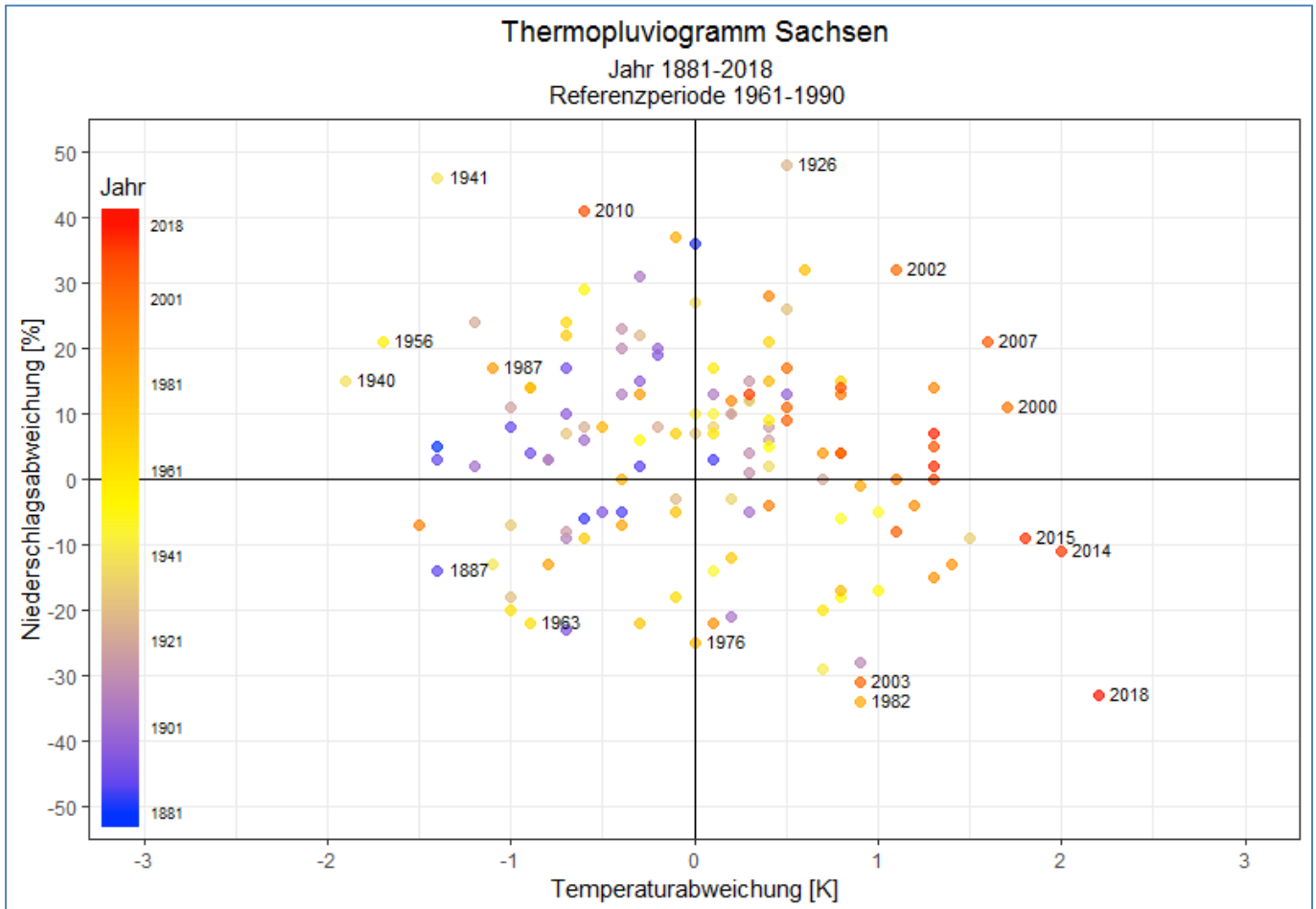


Abbildung 1: Thermopluviogramm für Sachsen. Anomalien des Gebietsmittels der Jahresmitteltemperatur und des Jahresniederschlags

Der Klimawandel bewirkt durch den Anstieg der Temperatur eine Erhöhung der potentiellen Verdunstung und damit des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes. Damit gehen zeitliche und räumliche Veränderungen des Niederschlags-, Verdunstungs- und somit des Feuchtigkeitsregimes einher. Die Jahresniederschlagssummen steigen zwar in Sachsen seit 1961, jedoch nicht signifikant. Jedoch fällt die Vegetationsperiode I (April–Juni) deutlich trockener aus als in der Vergangenheit und die Vegetationsperiode II (Juli–September) feuchter (BERNHOFER et al. 2015a, HÄNSEL et al. 2015). In der Vegetationsperiode II nahmen jedoch auch Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen zu, so dass sich die Niederschlagszunahme tendenziell als eine Folge von trockenen Perioden zeigt, die von starken Niederschlagsereignissen unterbrochen wird. Diese haben, da die Infiltrationsfähigkeit des Bodens gegebenenfalls nicht ausreicht, ein erhöhtes Potential für Erosion, wildabfließendes Wasser, für eine verminderte Wiederauffeuchtung des Bodens etc. Die Klimaprojektionen für Sachsen (BERNHOFER ET AL. 2016) weisen auf ansteigende Temperaturen, trockenere Sommer und feuchter Winter und somit auf eine sommerliche Verschärfung der Trockenheitsproblematik hin.

Trockenperioden sind ein natürlicher Bestandteil eines jeden Klimas und dessen Variabilität, da sie eine Abweichung im Feuchtigkeitsregime gegenüber den Normalbedingungen darstellt. So gab es in Sachsen sehr intensive und langan-

haltende Trockenperioden mit enormen Auswirkungen auf viele sozioökonomische und ökologische Bereiche (z. B. 1964, 1976, 1982, 1988–1993, 2003, 2018). Interessant ist die Frage, ob sich die Trockenheitsbedingungen im Rahmen des Klimawandels in Sachsen verändert haben bzw. wie die Aussichten für die nächsten Jahrzehnte sind. Die Häufung von Hitze- und Feuchtigkeitsstress sowie von Stürmen hatte in den letzten Jahren enorme Auswirkungen auf Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie weitere Bereiche. Zur Planung und Koordinierung von Anpassungsmaßnahmen ist eine detaillierte Kenntnis der klimatischen Randbedingungen und deren Veränderungen unabdingbar.

Schwerpunkt dieses Berichtes ist die Analyse der atmosphärischen Bedingungen, die eine Ausbildung von Trockenheitssituationen begünstigen und eine Art „Türöffner“ für landwirtschaftliche, hydrologische oder sozioökonomische Dürre darstellen.

Für Aussagen zu bisherigen und zukünftig möglichen Änderungen im Auftreten von Trockenheitssituationen in Sachsen werden geeignete Trockenheitsmerkmale (gegebenenfalls Kombinationen) identifiziert bzw. erarbeitet. Die Basis hierbei bilden Atmosphärenparameter, deren Verfügbarkeit sowohl in langfristigen Beobachtungen als auch in langfristigen Klimaprojektionen (Zeitraum 1961–2100) gegeben ist.

Zur Validierung der Trockenheitsmerkmale werden zum einen Impaktdaten (d.h. Informationen aus dem Bereich Klimafolgen im Allgemeinen, hier Forst, Landwirtschaft, Hydrologie) und zum anderen weitere Trockenheitsindikatoren (Bodenfeuchte- und Vegetationsindizes) genutzt.

Dieser Bericht fasst mehrere auf Trockenheit ausgerichtete Forschungsvorhaben des LFULG zusammen, die seit 2015 an der Professur für Meteorologie der TU Dresden und vom Interdisziplinären Ökologischen Zentrum der TU Bergakademie Freiberg erarbeitet wurden. Es werden stationsspezifische und flächendeckende Auswertungen von atmosphärischen Trockenheitsmerkmalen in Sachsen mit Analysen der Bodenfeuchte und der Auswirkungen auf einige sozio-ökonomische Bereiche zusammengefasst. Ziel ist weiterhin die Erstellung eines umsetzungsfähigen Konzeptes zur Analyse von Trockenheitsmerkmalen in Sachsen, dessen Anwendung auf einer dann neuen klimatologischen Datengrundlage (bis 2020) vorgesehen ist. Dies stellt einen Beitrag zur weiteren Entwicklung bzw. Fortschreibung von Anpassungsstrategien im Klimafolgenbereich dar. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse für eine stärkere Sensibilisierung der breiten Öffentlichkeit für das Thema „Trockenheit“ genutzt werden.

2 Begriffe Trockenheit und Dürre

Das Phänomen Trockenheit ist auf ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Parameter zurückzuführen. Es ist weniger greifbar als andere Naturgefahren wie Erdbeben oder Überschwemmungen, weil es sich schleichend entwickelt (z.B. MAYBANK et al. 1995). Die Auswirkungen sind zudem meist nicht sofort offensichtlich, da i.d.R. keine strukturellen Schäden hervorgerufen werden. Dennoch können Dürren viele Menschen beeinträchtigen und es kann zu erheblichen ökonomischen Verlusten kommen. Wenn die Folgen von Trockenheit katastrophale Ausmaße annehmen, liegt das oft an organisatorischen, administrativen und politischen Problemen (PLAPP 2003). Dürren an sich können nicht verhindert werden, wohl aber lässt sich die Vulnerabilität der Gesellschaft ihnen gegenüber verringern (BACHMAIR et al. 2015b), zumal Dürren nicht plötzlich und unerwartet hereinbrechen.

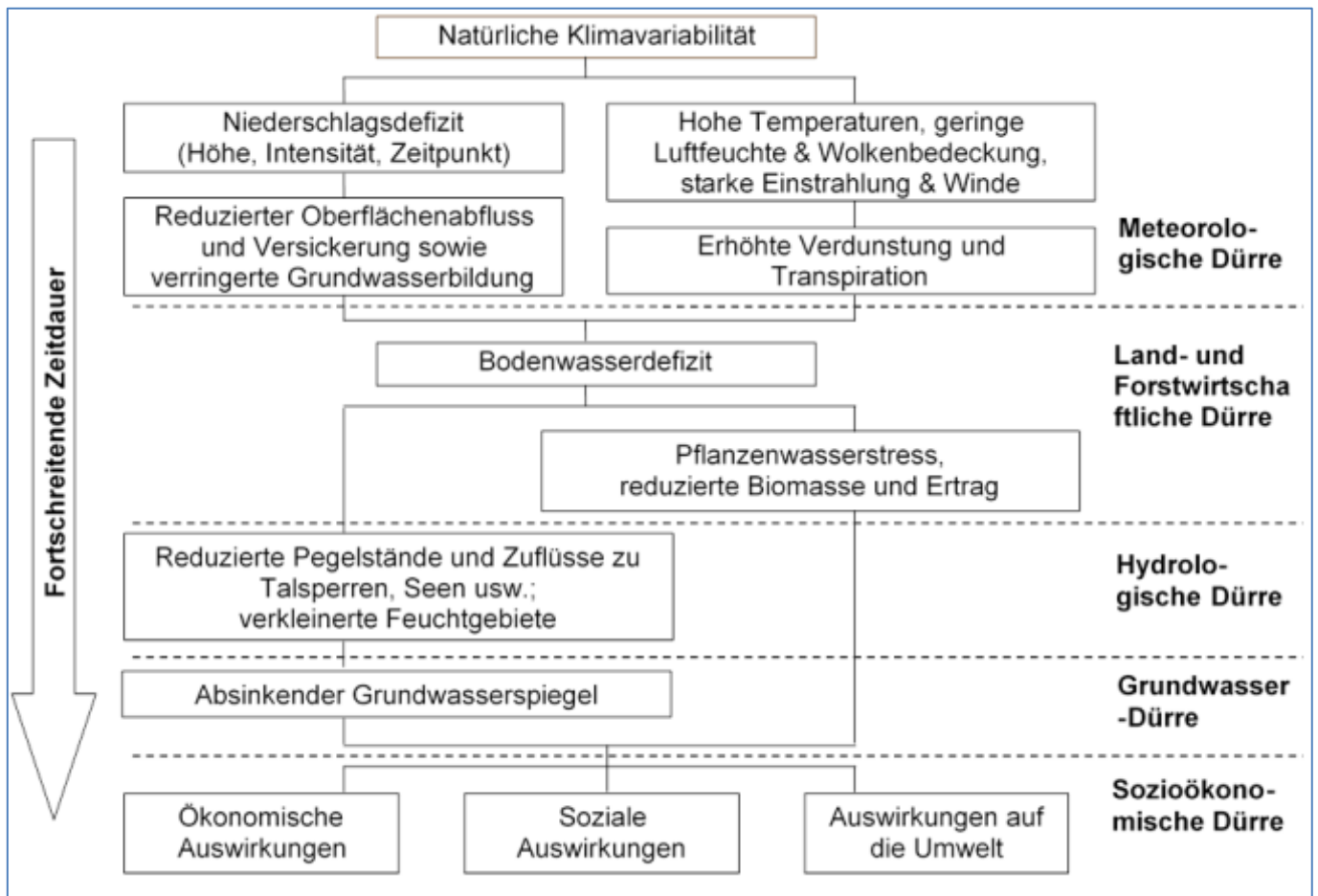


Abbildung 2: Zeitliche Abfolge eine Dürre (aus Bernhofer et al. 2015b)

Generell stellt die Definition von Trockenheit bzw. Dürre einen potentiellen Stolperstein für Trockenheitsanalysen dar, da Trockenheit mit vielfältigen Auswirkungen auf verschiedenen Zeit- und Raumskalen wirkt.

Es gibt keine universale Definition der Begriffe Dürre bzw. Trockenheit aufgrund der unterschiedlichen Sichtweisen auf die Begriffe. Eine Definition von Dürre bzw. Trockenheit ist dabei keine rein akademische Beschäftigung, sondern hat bedeutenden Einfluss auf Strategien und Handlungen in Politik und Verwaltung, wie SMAKHTIN und SCHIPPER (2008) aus ihrer Diskussion der Wortbedeutungen und Wahrnehmungen von Dürre im Feld der Naturgefahrenforschung und deren Managements schlussfolgern. Eine Auswahl von gebräuchlichen (sektoralen) Trockenheitsindizes wurde in BERNHOFER et al. (2015b) zusammengestellt. Das Sprachverständnis der Begriffe Trockenheit und Dürre ist des Weiteren bei Vertretern von Fachbehörden unterschiedlich, wie eigene Befragungen in Fachbehörden des Landes Sachsen ergaben.

Im deutschen Sprachgebrauch wird das Verständnis des Dürrekonzeptes durch das Vorhandensein der zwei unterschiedlich interpretierten Begriffe ‚Dürre‘ und ‚Trockenheit‘ zusätzlich verkompliziert (Englisch: *drought*). Generell verwenden die meisten Anwender eher Begriffe wie ‚Trockenperiode‘, ‚Trockenjahr‘, etc., während der Dürrebegriff eher mit Landwirtschaft und dem Auftreten von Folgewirkungen bzw. Schäden durch zu trockene Bedingungen in Beziehung gebracht wird. Viele verstehen unter Trockenheit eine längere Periode mit einem Niederschlagsdefizit. Andere machen die Definition von bestimmten Indizes und deren Unterschreitungshäufigkeiten abhängig. Für einige Anwender kommen bei Dürren geringe Niederschlagsmengen mit hohen Temperaturen zusammen, wodurch Dürre zu einer Art Steigerung von Trockenheit wird. Andere sehen die Steigerung von Trockenheit zu Dürre eher in der längeren Andauer und dem sich dadurch größeren aufbauenden Wasserdefizit, das zu spürbaren Auswirkungen in den verschiedenen Sektoren führt.

In dieser Arbeit werden die Begriffe Trockenheit und Dürre synonym verwendet.

Bei der Analyse von Trockenheit und deren Auswirkungen auf verschiedene Sektoren ist es wichtig den Zeitskalenübergreifenden Charakter von Trockenheit zu verstehen. Ausgehend von einem Niederschlagsdefizit (bzw. einer negativen Anomalie in der klimatischen Wasserbilanz) nimmt mit fortschreitender Andauer einer Trockenheit die nutzbare Feldkapazität des Bodens ab. In der Folge entwickeln sich landwirtschaftliche (zumeist wenige Monate Andauer) und hydrologische Dürren (zumeist > 6 Monate Andauer). Kurze Phasen mit überdurchschnittlichen Niederschlägen, die aus meteorologischer Sicht wieder zu Normalbedingungen führen, gleichen zunächst die Defizite im Bodenwasserspeicher aus. Dies gilt jedoch nicht für das Grundwasser. Da es sich bei der Versickerung von Wasser um einen Monate bis Jahre andauernden Prozess handelt, werden die über längere Zeiträume akkumulierten Defizite nicht sofort ausgeglichen.

3 Daten

Die Trockenheitsmerkmale werden auf Basis täglicher Daten des DWD berechnet. Die Validierung erfolgt mit nicht-meteorologischen Indikatoren, wie dem Bodenfeuchte- und einem Vegetationsindex sowie mit Daten zu den Auswirkungen von Dürren aus Hydrologie, Forst- und Landwirtschaft (Impaktdaten).

3.1 Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes

Die Untersuchungen erfolgten zum einen stationsbasiert für den Zeitraum 1951–2018. Die Auswahl der DWD-Messstationen in Sachsen richtete sich nach der Datenverfügbarkeit für Niederschlag, Sonnenscheindauer und Mitteltemperatur sowie deren Repräsentativität im Freistaat (Abdeckung relevanter Klimaräume). Die in Tabelle 1 zusammengefassten sechs Stationen wurden für die folgenden Analysen verwendet, da sie keine oder nur relative wenige Fehlwerte aufweisen. Die Lücken in den Zeitreihen wurden mit dem *gradient boosting* Ansatz (KÖRNER et al. 2018) komplett aufgefüllt. Die Güte der Lückenfüllung ist sehr gut, wie die hohen Bestimmtheitsmaße und geringen Fehler belegen (Tabelle 1). Von einer Nutzung des sächsischen lückengefüllten Referenzdatensatzes wurde abgesehen, da dieser nur den Zeitraum bis 2015 abdeckt. Eine Lückenfüllung der aktuellen Periode mit einem alternativen Ansatz würde eine Inkonsistenz in die Datenreihe bringen. Die Korrektur der täglichen Niederschlagsdaten erfolgte nach Richter (1995).

Tabelle 1: Analytierte Stationen und Güte der Lückenfüllung, Ergebnis einer Kreuzvalidierung für den Zeitraum 1951–2018 (R²: Bestimmtheitsmaß und RMSE: Root Mean Square Error)

Stations-ID	Name	Niederschlag			Sonnenscheindauer			Mittlere Temperatur		
		Anzahl Lücken	R ²	RMSE	Anzahl Lücken	R ²	RMSE	Anzahl Lücken	R ²	RMSE
853	Chemnitz	0			0			0		
1048	Dresden-Kl.	3561	0.94	1.71	3636	0.95	0.98	3557	1.00	0.48
1358	Fichtelberg	0			0			0		
1684	Görlitz	0			7	0.91	1.33	0		
2932	Leipzig-Halle	7791	0.74	1.74	7791	0.95	1.00	7791	1.00	0.35
3946	Plauen	77	0.83	1.74	5051	0.94	1.02	80	0.99	0.60

Um regionale Unterschiede von Trockenheitsmerkmalen in Sachsen zu veranschaulichen, wurden die Rasterklimadaten von Niederschlag, Temperatur und Potentieller Verdunstung (Turc-Wendling-Ansatz, DVWK 2002) der Periode 1961–2014 genutzt, die in 1 x 1 km Auflösung vorliegen (RaKliDa; Bernhofer et al. 2009).

3.2 Bodenfeuchte

Zur Validierung der meteorologischen Trockenheitsmerkmale wird der Bodenfeuchteindex (SMI, *soil moisture index*) der Periode 1951–2017 verwendet, der im Rahmen des Online-Dürremonitors¹ für Deutschland berechnet wird (ZINK et al. 2016). Das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ betreibt zu diesem Zweck das mesoskalige, prozessbasierte hydrologische Modell mHM (SAMANIEGO et al. 2010). Die Modellierungen erfolgen auf Basis täglicher Klimadaten des DWD, die auf ein 4 x 4 km² Gitter interpoliert werden. Die Bodenfeuchte wird für drei Schichten berechnet: 0,05 m, 0,20 m und einer durch die Bodeninformationen vorgegebenen maximalen Tiefe (im Mittel 1,8 m). Als statistische Referenz wurden die täglichen Bodenfeuchten für die Periode 1954–2013 berechnet. Jeder einzelne Wert der Bodenfeuchte wird aus den Bodenfeuchten der 30 vorangegangenen Tage durch Mittelung berechnet, damit handelt es

¹ <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>

sich um Monatswerte. Hieraus können nun für jede Gitterzelle und für jeden Zeitpunkt (insgesamt 365 Tage) die Perzentile² berechnet werden, also die Wahrscheinlichkeiten für das Erreichen einer bestimmten Bodenfeuchte. So wird beispielsweise am Gitterpunkt X eines Frühlingstages ein Wert der Bodenfeuchte von 0,3 mm an maximal 2 % der Tage erreicht (2. Perzentil) und ein Wert von 12 mm an maximal 95 % der Tage. Am benachbarten Gitterpunkt Y sind die Perzentile der Bodenfeuchte verschieden (aufgrund der räumlichen Variabilität des Bodens, der Landnutzung und des Klimas). Auch in einem anderen Monat entspricht ein Bodenfeuchtwert des Gitterpunktes X von 0,3 wahrscheinlich einem anderen Perzentil. So sind z.B. im Sommer die Bodenfeuchten generell geringer, sodass 0,3 mm häufiger vorkommen, also einem höheren Perzentil entsprechen. Zur Berechnung des Bodenfeuchteindex eines spezifischen Tages wird nun das Perzentil der aktuellen Bodenfeuchte hinsichtlich der Referenz ermittelt. Der Bodenfeuchteindex nimmt Werte zwischen 0 und 1 ein (0. bis 100. Perzentil). Im letzten Schritt erfolgt die Zuweisung des Bodenfeuchteindex zu einer Dürrekategorie (Tabelle 2). Wird beispielsweise eine Bodenfeuchte von 5 mm an einem Gitterpunkt berechnet, die in der Referenzperiode an 19 % der Tage erreicht wurde, so entspricht das einem SMI von 0,19 und somit einer ‚Moderaten Dürre‘ an diesem Tag. Die Einstufung einer Dürre erfolgt also stets bezogen auf einen spezifischen Gitterpunkt und einen Tag im Jahr. Dies muss bei der Interpretation der SMI-Werte bzw. Dürrekategorien beachtet werden. Zum besseren Verständnis sei auf die typischen monatliche Bodenfeuchten (als Anteil vom Sättigungswassergehalt) in Deutschland verwiesen (Abbildung 3), die auf Ensemblerechnungen von SAMANIEGO et al. (2013) beruhen. So sind beispielsweise zwischen November und April wegen der großen Niederschlagshöhen weite Teile des Bodens im Erzgebirge nahezu wassergesättigt. Erst wenn in der warmen Jahreszeit relevante Verdunstungsraten erreicht werden, trocknet der Boden ab. In den tieferen, weiter nördlich gelegenen Regionen ist die Bodenfeuchte generell geringer. Ein SMI von 0,5 (50. Perzentil = Median) entspricht in etwa den mittleren Verhältnissen des jeweiligen Monats. SMI-Werte unter 0,5 sind als negative Abweichung (Bodenfeuchtedefizit) von diesen mittleren Verhältnissen zu interpretieren.

Tabelle 2: Klasseneinteilung des Bodenfeuchteindex SMI (Zink et al. 2016; Vergleichszeichen korrigiert)

SMI-Klasse	Bezeichnung
$0,3 \geq \text{SMI} > 0,2$	Vorwarnstufe
$0,2 \geq \text{SMI} > 0,1$	Moderate Dürre
$0,1 \geq \text{SMI} > 0,05$	Schwere Dürre
$0,05 \geq \text{SMI} > 0,02$	Extreme Dürre
$\text{SMI} \leq 0,02$	Außergewöhnliche Dürre

² Methode: Ermittlung einer nicht-parametrischen Kernel basierten kumulativen Verteilungsfunktion (SAMANIEGO et al. 2013)

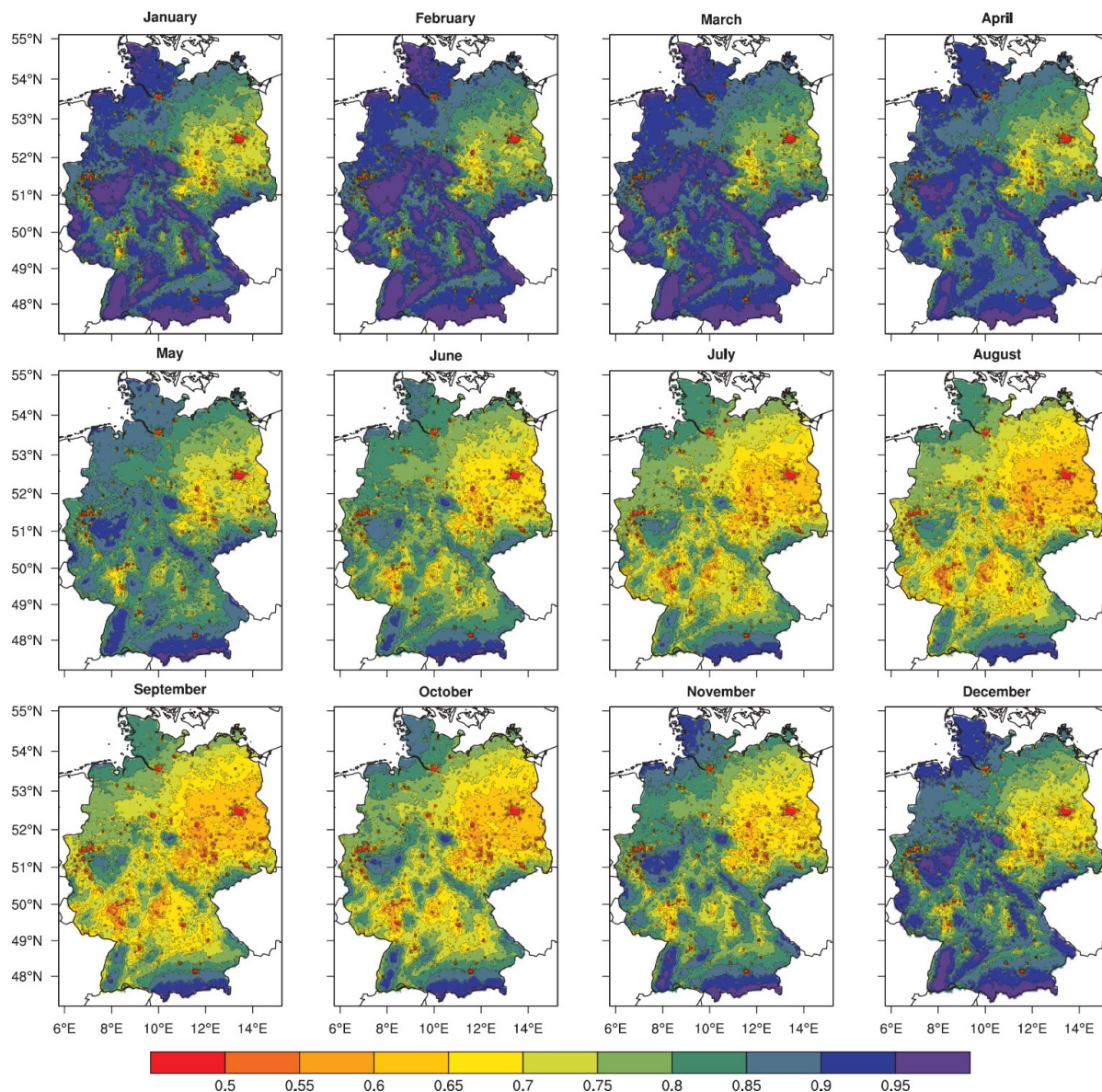


FIG. 2. Ensemble monthly mean soil moisture fraction over Germany for the period 1950–2010.

Abbildung 3: Mittlere monatliche Bodenfeuchte (Anteil vom Sättigungswassergehalt) der Periode 1950-2010. Mittel eines Modellensembles zur Berücksichtigung der Unsicherheiten der Parameterschätzung und der Niederschlagsinterpolation (aus Samaniego et al. 2013).

3.3 Vegetationsindex

Global beobachtende Satelliten, mit Instrumenten wie zum Beispiel dem ‚Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer‘ (MODIS) der NASA, liefern multispektrale Bilder, aus denen verschiedene Vegetationsindizes abgeleitet werden können. Für das Dürremonitoring wird häufig der Normalisierte Differenzen Vegetationsindex NDVI (ROUSE et al. 1974, TUCKER 1979) verwendet. Er wird aus der spektralen Reflexion im nahen infraroten und der im sichtbaren roten Bereich berechnet. Unter gesunden Bedingungen absorbiert das Chlorophyll der Pflanzen das Licht und reflektiert weniger im sichtbaren roten Bereich, was zu höheren NDVI-Werten führt. Unter anderem unter Trockenstress sinken die NDVI-Werte.

Eine Übersicht über mögliche frei zugängliche Datenbanken geben YENGOH et al. (2015). Die NDVI-Daten haben unterschiedliche zeitliche (täglich bis monatlich) und räumliche Auflösungen (250 bis 8000 m) und Reihenlängen. Für die angestrebte Anwendung waren monatliche Daten in einer räumlichen Auflösung von 1000 m anvisiert. Es wurde entschieden, MODIS-NDVI-Daten der NASA DIDAN (2015) mit diesen Kennwerten für den Zeitraum 07.2002–12.2018 zu verwenden. Mittels der Anwendung AppEEARS (2018) wurden für Sachsen und die nähere Umgebung die Daten heruntergeladen. Alternative Quellen mit zurzeit noch funktionierenden Systemen:

- Copernicus: seit 1999, 10 Tage, 1000 m (<https://land.copernicus.eu/global/products/ndvi>)
- MEDOKADS: seit 1989, täglich, ~5500 m, Format: einzelne Monatsdateien (<https://cerawww.dkrz.de/WDC/entry?acronym=Medokads>)
- S10, seit 1998, 10 Tage, 1000 m

Aufgrund des erhöhten Aufbereitungsaufwandes für die Bearbeitung der höheren zeitlichen Auflösung wurde von diesen Daten trotz der längeren Zeitreihe abgesehen.

3.4 Impaktdaten

In diversen Studien wurde die Kopplung zwischen den Indizes SPI und SPEI und Dürreauswirkungen in verschiedenen Systemen weltweit untersucht. Wesentliche Ergebnisse für die Klimafolgen-Bereiche Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sind in Tabelle 3 erfasst. Es zeigt sich eine breite Variabilität in den Zeitskalen, auf denen der Dürreindex am besten mit Auswirkungen korreliert. Wichtige Einflussgrößen sind die geographische Lage inklusive der klimatischen Einordnung des Untersuchungsgebietes, der Eingriffsgrad des Menschen, die betrachtete Pflanzenart sowie die Bodenverhältnisse vor Ort. Daher ist es nicht möglich, die für bestimmte Regionen oder unter bestimmten Randbedingungen erzielten Ergebnisse auf das jeweilige eigene Untersuchungsgebiet zu übertragen. Für die Entwicklung eines Konzeptes zur Identifizierung von Trockenheitsmerkmalen sind Analysen hinsichtlich der optimalen Zeitskalen und der Schwellenwerte von SPI und SPEI für die Identifikation von spezifischen Dürreauswirkungen in adressierten Klimafolgenbereichen notwendig.

Tabelle 3: Zusammenhänge zwischen den Dürreindizes SPI und SPEI mit Auswirkungen in den Bereichen Land-, Forst- und Wasserwirtschaft anhand einiger Studien (HÄNSEL et al. 2016)

Untersuchungsgegenstand (-gebiet)	Index (Zeitskala), Verdunstung	Ergebnis / bester Zusammenhang	Referenz
Landwirtschaft			
Weizen (global)	SPI & SPEI (1–24 Mon)	SPEI besser als SPI; Zeitskala abhängig vom Klima	(VICENTE-SERRANO et al. 2012)
Ertragsdaten Weizen, Mais, Reis, Gerste, Hafer, Soja (global)	SPEI (3 & 12 Mon) FAO-56 Penman-Monteith	SPEI besser als SPI; Verbesserung durch Berücksichtigung Bodenwasserhaushalt	WANG et al. (2014)
Mais-Ernteerträge (Tiefland Nord-CN)	SPEI (1–24 Mon) Penman-Monteith	3 Monate (JJA)	MING et al. (2015)
NDVI (CN)	SPEI (1–12 Mon) Thornthwaite	Grasland: 3 Mon.; Weide: 4 Mon. Kultivierte Vegetation: 2 Monate	LI et al. (2015)
Ernteerträge (Tiefland CZ)	SPEI (1–24 Mon) Haude	6 Monate (AMJJAS) für Wurzel-, Kohl-, Knollengemüse	POTOP et al. (2012)
EDII (BG, DE, GB, SI, NO)	SPEI (1–24 Mon) Penman-Monteith	Regenfeldbau: 2–3 Monate Bewässerung: 9–12 Monate	STAGGE et al. (2015)
Forstwirtschaft			
Dickenwachstum (Nordost ES)	SPI (1–48 Mon)	Humide Regionen: 1–5 Monate Semiaride Regionen: 9–14 Mon.	PASHO et al. (2011)
Dickenwachstum (global)	SPI & SPEI (1–48 Mon)	SPEI besser als SPI; in ariden Regionen größere Anfälligkeit des Baumwachstums	VICENTE-SERRANO et al. 2012)
Dickenwachstum (Nordhemisphäre)	SPEI (1–24 Mon) Penman-Monteith	Humide Regionen: 3–5 Monate Semiaride Regionen: 12–11 Mon.	VICENTE-SERRANO et al. (2014)
NDVI (CN)	SPEI (1–12 Mon) Thornthwaite	Nadelwald: 11 Monate Laubwald: 10 Monate	LI et al. (2015)
Wasserwirtschaft			
Abflüsse, Seepiegel (Pyrenäen ES)	SPI (1–24 Mon)	Fließgewässer: 1–3 Monate Stillgewässer: 7–10 Monate > 12 Monate unbrauchbar; Berücksichtigung saisonaler Schwankungen erforderlich	VICENTE-SERRANO und LÓPEZ-MORENO (2005)
Abflüsse, Seepiegel (Großes Becken, West-USA)	SPI, SPEI (1–72 Mon), Thornthwaite	Fließgewässer: 8–15 Monate Stillgewässer: 18–48 Monate (≤ 6 Mon. unbrauchbar; Bedeutung Größe des Speichervolumens)	McEVOY et al. (2012)
Abflüsse in 151 EZG (global)	SPI & SPEI (1–48 Mon)	Berücksichtigung des Hauptantriebs der Dürre für Bestimmung optimaler Dürreindex notwendig	(VICENTE-SERRANO et al. 2012)
Abflüsse, Seepiegel (Nordost-ES)	SPEI (1–48 Mon) Thornthwaite	Hohe EZG ohne Regulation: 2–4 Mon. Tiefere EZG mit hoher Reg.: 6–10 Mon. Tiefere EZG mit Grundwassereinfluss: 10–20 Mon.	LÓPEZ-MORENO et al. (2013)
EDII (BG, DE, GB, SI, NO)	SPEI (1–24 Mon) Penman-Monteith	Oberirdisches Wasser: 1 & 6 Mon. Unterirdisches Wasser: 3 & 9–12 Mon.	(STAGGE et al. 2015)

Für den Klimafolgenbereich Landwirtschaft wurden Analysen durchgeführt inwieweit die erzielten Ernteerträge ausgewählter Nutzpflanzen (Raps und Rüben, Silomais, Zuckerrübe, Kartoffeln) sowie verschiedener Getreidesorten (Winterweizen, Sommer- und Wintergerste, Roggen, Hafer) in Sachsen mit dem Auftreten von Trockenheit (SPI und SPEI) korrelieren. Die verwendeten Daten der Ernteerträge wurden vom Statistischen Landesamt erhoben und umfassen den Zeitraum 2006–2015. Das LfULG hat die Daten zur Verfügung gestellt.

Auf der Grundlage forstwirtschaftlicher Daten wurden ebenfalls Korrelationsanalysen durchgeführt. Dafür wurden Datensätze zu aufgetretenen Dürreschäden, Waldbränden und Schädlingsbefall (Buchdrucker, Kupferstecher, Eichenfraßgesellschaften) ausgewertet. Die Datensätze wurden von Sachsenforst zur Verfügung gestellt und decken den Zeitraum 1971–2018 ab.

Am Beispiel ausgewählter Einzugsgebiete unterschiedlicher Größe (Abbildung 4; Anlage 1) hinsichtlich des Auftretens von Trockenheit ausgewertet und mit den Ergebnissen der klimatologischen Indizes SPI und SPEI verglichen. Die verwendeten Durchflussdaten für den Zeitraum 1961–2010 beruhen auf dem Hydrologischen Handbuch Sachsen (LfULG 2014). Viele der Pegel wurden verlegt und/oder weisen Beeinflussungen (z.B. durch den Bau von Hochwasserrückhaltebecken HRB) in unterschiedlichem Ausmaß auf.

Für eine Analyse der Auswirkungen von Trockenperioden auf das Grundwasser wurden Grundwassermessstellen ausgewählt (Abbildung 5, Anlage 2), die von anthropogenen Einflüssen weitgehend unbeeinflusst sind.

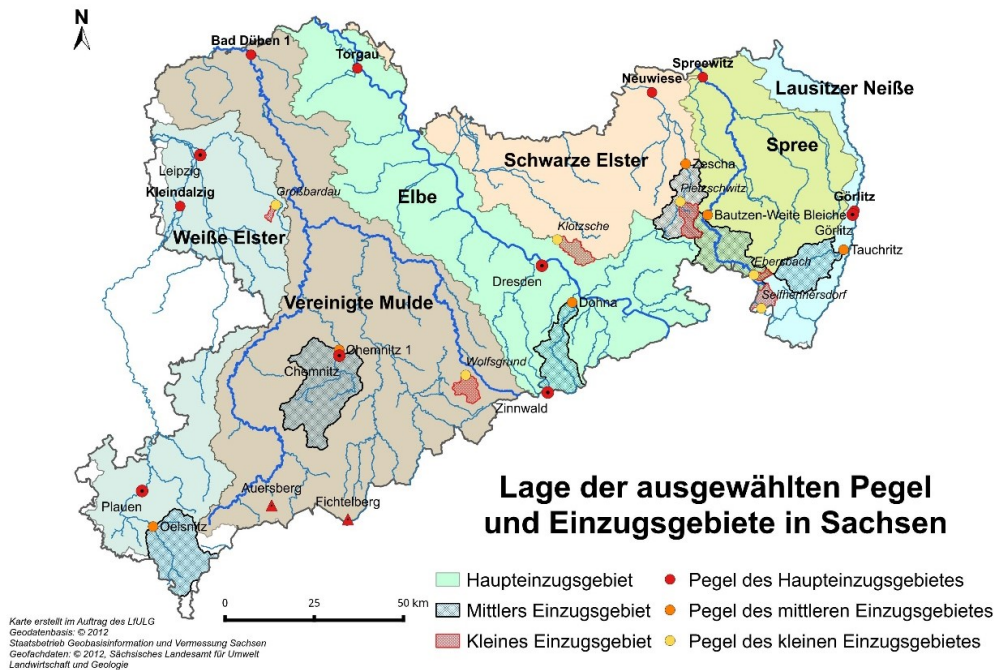


Abbildung 4: Karte der analysierten Einzugsgebiete inklusive der verwendeten Pegel.

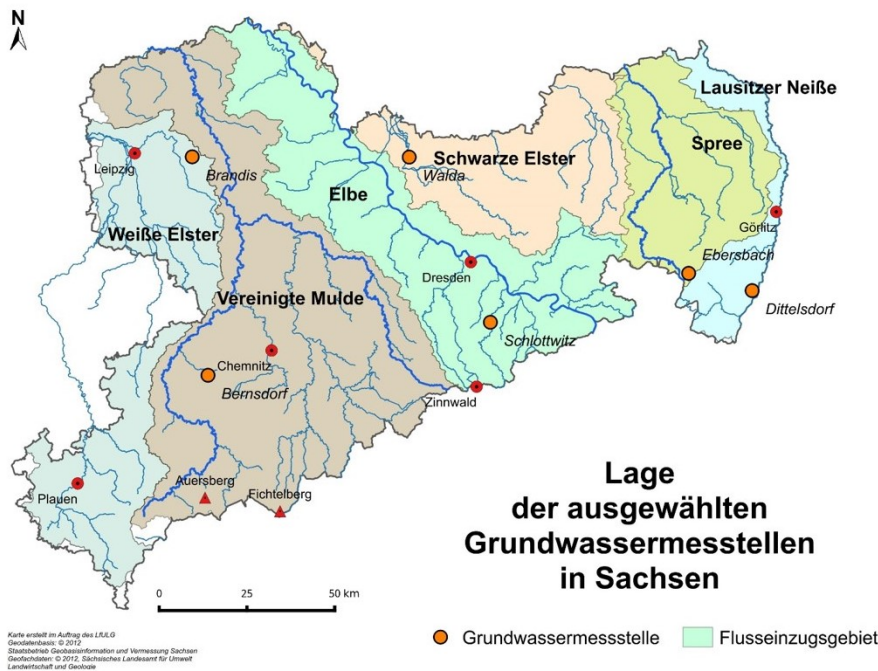


Abbildung 5: Lage der analysierten Grundwassermessstellen.

4 Methoden

4.1 Allgemeine Festlegungen

Für die Trockenheitsmerkmale werden i.d.R. folgende Vergleichszeiträume analysiert:

- die Referenzperiode (RP) 1961–1990,
- die aktuelle Periode (AP) 1991–2017,
- die Dekaden von 1951 bis 2010 sowie
- die noch unvollständige aktuelle Dekade 2011–2017.

Die Analysen erfolgen i.d.R. jeweils für folgende Bezugszeiträume:

- die Jahreszeiten: Frühjahr, Sommer, Herbst, Winter (MAM, JJA, SON, DJF)
- die Vegetationsperioden (VP I: AMJ; VP II: JAS)
- die hydrologischen und meteorologischen Halbjahre, (SHJh: MJJASO, SHJm: AMJJAS, WHJh: NDJFMA, WHJm: ONDJFM) das Kalenderjahr (J–D) und das Wasserhaushaltsjahr (ND, J–O).

4.2 Meteorologische Trockenindizes

Bisher gibt es wenige empirische Belege dafür, welcher Indikator Dürrebedingungen für einen gegebenen Sektor am besten repräsentiert (BACHMAIR et al. 2015b). In eigenen Vorarbeiten (BERNHOFER et al. 2015b, HÄNSEL et al. 2016) wurden zahlreiche Trockenheitsindizes (TI) in den Kategorien „Meteorologische TI“, „Landwirtschaftliche TI“, „Hydrologische TI“, „TI basierend auf Fernerkundungsdaten“ und „Kombinierte TI“ beschrieben sowie eine Auswahl an gebräuchlichen meteorologischen Indizes getestet. Auf dieser Grundlage wurden zur Identifikation von Trockenheitsphasen in diesem Bericht die folgenden, auf meteorologischen Eingangsdaten beruhenden Indizes verwendet:

- SPI: Standardisierter Niederschlagsindex (Standardized Precipitation Index)
- SPEI: Standardisierter Niederschlags-Verdunstungsindex (Standardized Precipitation-Evpotranspiration Index)
- RDI: Reconnaissance Dürreindikator (Reconnaissance Drought Indicator)

Hierbei handelt es sich um international häufig genutzte Indizes, die auf dem korrigierten Niederschlag (SPI) und zusätzlich der potentiellen Verdunstung (bei SPEI und RDI) beruhen. Letztere wurden zur Beschreibung der Bodenwasserschwankungen genutzt (HALWATURA et al. 2017, ASADI ZARCH et al., 2015). Vorteil des SPI ist – da nur monatliche Niederschläge eingehen – die sehr gute Datenverfügbarkeit. Jedoch werden weitere Variablen, die das Ausmaß einer Dürre beeinflussen können, nicht berücksichtigt. SPEI und RDI nutzen zusätzlich die potentielle Verdunstung und korrelieren somit eher mit Impaktvariablen sowie hydrologischen und landwirtschaftlichen Dürreindizes (BACHMAIR et al. 2015a).

4.2.1 Standardisierter Niederschlagsindex SPI

Der SPI ist eine aus dem kumulierten Niederschlag abgeleitete Größe. Damit kann abgeschätzt werden, wie nass oder trocken ein Zeitabschnitt im Vergleich zu den durchschnittlich „normalen“ Niederschlagsverhältnissen ist. Der SPI wurde in Colorado (USA) von MCKEE et al. (1993) entwickelt und basiert auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Niederschlags. Er benötigt weniger Eingangsdaten und hat einen geringeren Berechnungsaufwand als der bis dahin weit verbreitete Palmer Dürreschwereindex PDSI (PALMER 1965). Trotz seiner geringeren Komplexität gegenüber dem Palmer-Index kann der SPI frühe Dürrewarnungen liefern und bei der Bewertung der Schwere einer Trockenheit helfen.

Die Häufigkeiten bestimmter Dürrezustände (Trockenheitskategorien siehe Tabelle 4) sind durch die Normalverteilung festgelegt (die Indexwerte sind als Vielfaches der Standardabweichung vom Normalwert angegeben). Die Seltenheit eines Dürreereignisses kann zuverlässig bestimmt werden.

Tabelle 4: Einteilung der SPI-Werte in Feuchtezustandskategorien (nach GUTTMAN 1999; MCKEE et al. 1993)

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 feucht (<i>Mildly wet</i>)	Nahe normal (<i>near normal</i>)	≈ 34 %
0 > SPI > -0,99	Leicht trocken (<i>Mildly dry</i>)		≈ 34 %
-1,00 > SPI > -1,49	Moderate trocken (<i>Moderately dry</i>)		9,2 %
-1,50 > SPI > -1,99	Starke trocken (<i>Severely dry</i>)		4,4 %
SPI < -2	Extrem trocken (<i>Extremely dry</i>)		2,3 %

Der Hauptvorteil des SPI gegenüber den PDSI liegt in der Analysemöglichkeit von Dürreauswirkungen auf unterschiedlichen Zeitskalen. Damit kann der SPI unterschiedliche Dürretypen identifizieren. Der SPI wird im Allgemeinen für Zeitschritte zwischen 1 und 48 Monaten (potentiell auch bis 72 Monate) berechnet, wodurch Auswirkungen eines Niederschlagsdefizits auf verschiedene Wasserhaushaltsgrößen, wie Bodenwasserverfügbarkeit, Abflussmenge sowie Grundwasserneubildung bewertet werden können.

Wie Merkmale von Trockenperioden berechnet werden, sei am Beispiel einer mittels des SPI definierten Trockenperiode erläutert. Eine Trockenperiode beginnt bei SPI < 0 und endet bei SPI > 0, wobei der SPI mindestens einmal den Wert -1 unterschreiten muss. Nun können Häufigkeit, Andauer, Ausmaß (positive Summe des SPI aller Monate innerhalb der Trockenperiode: HAYES 1999) und Intensität (Verhältnis von Ausmaß und Andauer; im Bericht teilweise auch als ‚mittlere Schwere‘ bezeichnet) berechnet werden. Als schwere Trockenperioden werden Werte verwendet, die dauerhaft -1,5 unterschreiten.

Die Bewertung von Trockenheitsbedingungen erfolgt auf unterschiedlichen Zeitskalen (Aggregierungsstufen), um verschiedene Dürre/Trockenheitstypen anzusprechen (Abbildung 2). Typische Zeitskalen sind 3, 6, 9 12 und 24 Monate.

4.2.2 Standardisierter Niederschlags-Verdunstungsindex SPEI

Der von VICENTE-SERRANO et al. (2010) vorgeschlagene Standardisierte Niederschlags-Verdunstungsindex SPEI kombiniert Niederschlags- und weitere Klimadaten. Seine Berechnung basiert auf der Berechnungsmethodik des SPI unter Nutzung der monatlichen (oder wöchentlichen) klimatischen Wasserbilanz (Differenz von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration; THORNTHWAITE 1948) – anstelle des Niederschlags. Dabei ist die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration schwierig, weil vielfältige Parameter benötigt werden. Es existieren verschiedene Ansätze zur direkten Berechnung der potentiellen Verdunstung aus meteorologischen Daten (HÄNSEL et al. 2016). Es wurde getestet inwieweit sich die Ansätze nach THORNTHWAITE, TURC-WENDLING, GRASREFERENZVERDUNSTUNG auf die Berechnung des SPEI auswirken. Es zeigt sich ein enger Zusammenhang der Indexwerte bis in die extremsten Bereiche der Verteilung hinein. Insbesondere die Verdunstungsansätze Grasreferenzverdunstung und TURC-WENDLING führen zu sehr ähnlichen Indexwerten, während der THORNTHWAITE-Ansatz zu etwas größeren Abweichungen führt. Die Trockenheitsbewertung ist somit relativ robust gegenüber dem gewählten Ansatz zur Schätzung der potentiellen Evapotranspiration.

Für die Klassifizierung des Feuchtigkeitszustandes wird das gleiche Schema wie für den SPI (Tabelle 4) verwendet.

Nach Abschluss der Datenprüfung werden SPI bzw. SPEI für jede Zeitskala und Rasterzelle berechnet. Im Anschluss wird für jeden Zeitschritt entsprechend der Wirkungsskala ein ASCII-Rasterdatensatz generiert. Zwei Verdunstungsschätzer (GRASREFERENZVERDUNSTUNG und nach TURC-WENDLING) liegen bereits fertig gerechnet als Rasterdatensatz vor. Für den in internationalen Studien aufgrund seiner geringen Datenanforderungen häufig verwendeten Ansatz nach THORNTHWAITE erfolgte die Berechnung der monatlichen Verdunstungswerte basierend auf dem Rasterdatensatz der Mitteltemperatur.

4.2.3 Reconnaissance-Dürreindex RDI

Der Reconnaissance-Dürreindex RDI kann als eine Erweiterung des Standardisierten Niederschlagsindex SPI verstanden werden. Er setzt den Niederschlag vor Ort der Evapotranspiration gegenüber. Durch Standardisierung und Normalisierung werden die gleichen Dürreschwereklassen wie beim SPI erreicht. 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 in mediterranen bis ariden Gebieten verwendet und für verschiedene Klimazonen mit dem SPI verglichen.

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

Der standardisierte RDI wird im Rahmen der stationsbasierten Untersuchungen von Trockenheitsmerkmalen berechnet.

4.2.4 Auswahl der besten Verteilungsfunktion

Für den SPI wurden flächenhafte Tests in Bezug auf die Verteilungsfunktion durchgeführt, welche die Niederschlagsdaten auf verschiedenen Zeitskalen am besten wiedergibt. Als Kriterium der Anpassungsgüte einer Verteilungsfunktion wird die Anpassungsmethodik AIC (*Akaike information criterion*) genutzt. Die Kartendarstellungen (Abbildung 6) zeigen, dass die Gamma-Funktion flächenhaft über alle Zeitskalen hinweg am geeignetsten ist. Auf der Zeitskala von einem Monat funktioniert im Westen Sachsens die Weibull-Verteilung etwas besser als die Gamma-Verteilung. Auf den längeren Zeitskalen gibt es Regionen im Osten Sachsens (v.a. um Görlitz), für welche die Log-Normalverteilung als optimale Verteilungsfunktion identifiziert wurde. Für Gebiete, wo die Gamma-Verteilung nicht optimal ist, weist sie nur geringfügig schlechtere Anpassungsmaße auf.

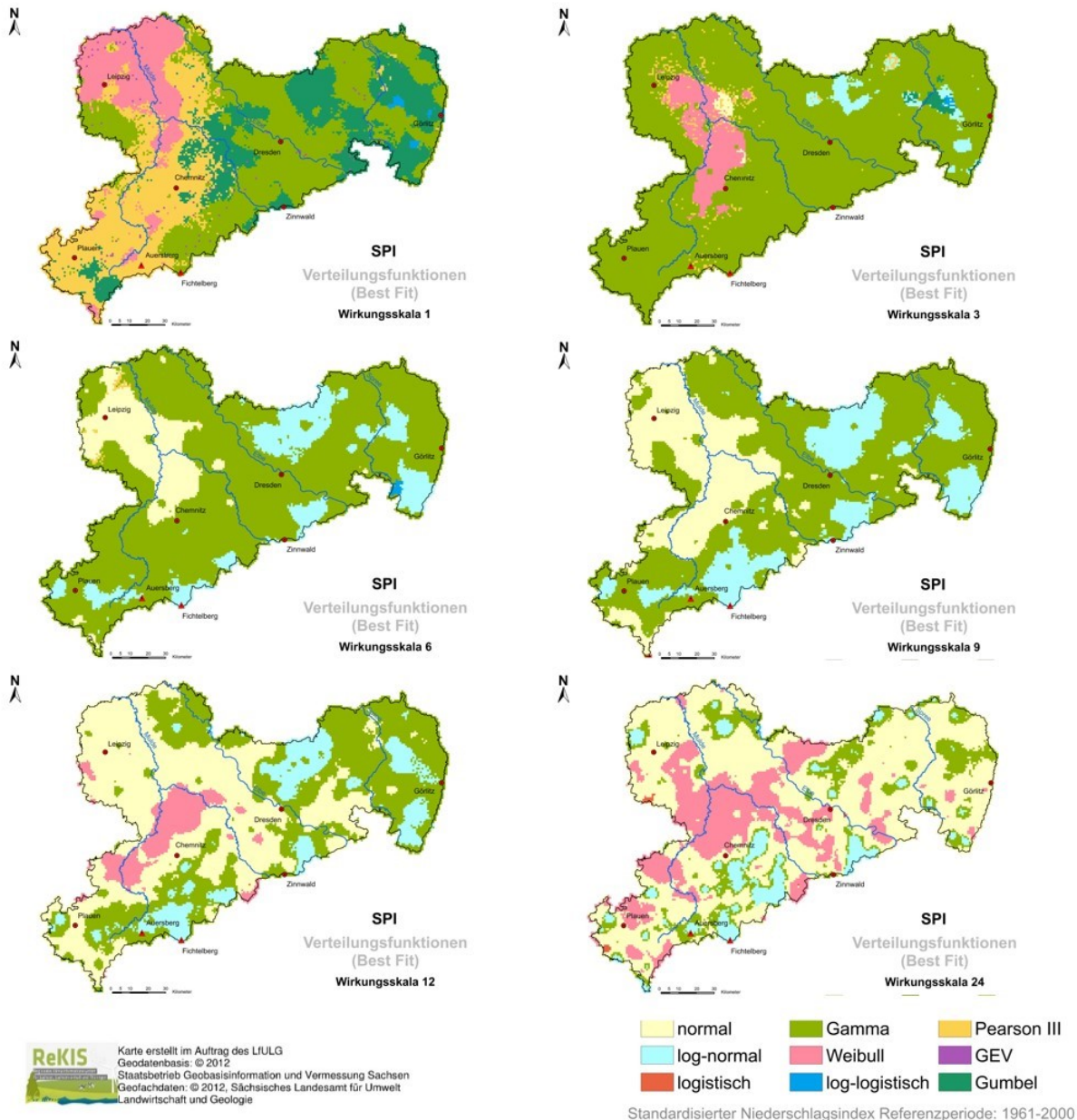


Abbildung 6: Räumliches Verteilungsmuster der optimalen Verteilungsfunktion für die Berechnung des SPI auf unterschiedlichen Zeitskalen.

Für die Untersuchung der optimalen Verteilungsfunktion für den SPEI wurden zunächst drei-parametrische Verteilungsfunktionen (log-logistische und Pearson-III-Verteilung) getestet. Im Gegensatz zur Literatur dominiert in Sachsen für die meisten Zeitskalen die Pearson-III-Verteilung. Dieser Unterschied könnte auf die abweichende Methodik zur Bestimmung des Gütemaßes (AIC vs. KS-Test) zurückzuführen sein. Im Folgenden wurden die Werte der klimatischen Wasserbilanz transformiert, sodass sie alle im positiven Bereich liegen (Minimalwert = 0). Dadurch ist die Verwendung von zwei-parametrischen Verteilungen möglich, die auch für den SPI verwendet wurden. Der Anpassungstest dieser Verteilungsfunktionen ist in den Kartendarstellungen der Abbildung 6 dargestellt.

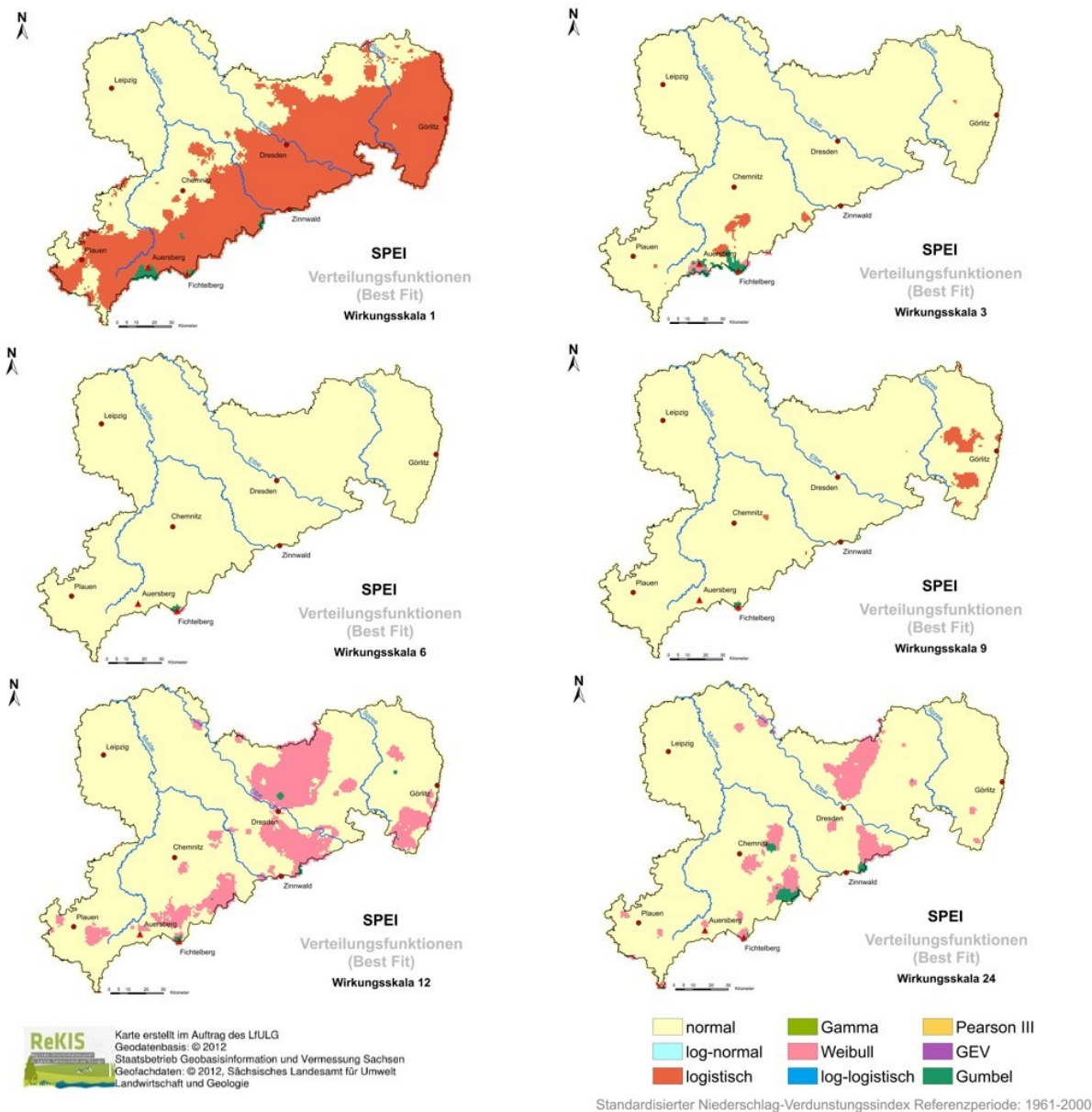


Abbildung 7: Wie Abbildung 6, jedoch für den SPEI.

Die aufwendig zu berechnenden, drei-gliedrigen Parameter werden auf keiner Wirkungsskala als optimale Verteilungsfunktion in Sachsen eingestuft. Über sämtliche Zeitskalen hinweg tritt die Normalverteilung am häufigsten auf, so dass bei weiteren Untersuchungen auch diese zur schnelleren Berechnung des SPEI genutzt wird.

Zur Festlegung der optimalen Verteilungsfunktion für den RDI wurde eine Analyse anhand der sechs Klimastationen durchgeführt. Für die absoluten RDI-Werte wurden folgende typische Verteilungsfunktionen untersucht: Gumbel, Gamma, Normal, Pearson III, Logistisch, Log-logistisch, Log-normal und Weibull. Dabei wurden die Aggregierungsstufen 1, 3, 6, 9, 12 und 24 Monate berücksichtigt. Die Auswahl der besten Verteilungsfunktion fand basierend auf den Kriterien AIC und BIC statt. Zusätzlich wurde in einigen Fällen nach einer visuellen Begutachtung eine Verteilungsfunktion gewählt, die sich besser an das untere (trockene) Ende der Verteilungsfunktion anpasst. Über die sechs Stationen und verschiedenen Aggregierungsstufen gab es keine eindeutig beste Verteilungsfunktion. Vielmehr kommen für die Aggregierungsstufen ein bis drei Monate die Gamma-, die Normal-, die Person II und weitere infrage. Für größere Aggregierungsstufen stellte sich die Weibullverteilung als beste heraus.

In der Zusammenschau der Suche nach der optimalen Verteilungsfunktion für die Kennwerte wurden folgende Verteilungsfunktionen als die geeignetsten identifiziert und für die weitere Arbeit festgelegt:

- Für den SPI: Gammaverteilung
- Für den SPEI: Normalverteilung
- Für den RDI: Log-Normalverteilung für RDI 1 - 4 und Weibullverteilung für RDI > 4.

4.2.5 Wahl der Referenzperiode

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein 40 Jahre langer Referenzzeitraum verwendet (1961–2000). Dieser Zeitraum entspricht dem des ersten Teils des Trockenheitsprojektes (BERNHOFER et al. 2015b). Zusätzlich wurde die Ausprägung der Indexwerte für zwei 30-jährige Referenzzeiträume (1961–1990 und 1981–2010) verglichen.

4.3 Hydrologische Trockenindizes

Abflussdaten von Flüssen oder Grundwasserstände können in ähnlicher Weise standardisiert werden wie der Niederschlag. Aus den Abflussdaten wurde ein Standardisierter Abflussindex SSI (*Standardized Streamflow Index*, SHUKLA UND WOOD 2008) berechnet, der für die Bewertung hydrologischer Trockenheit verwendet wird und in seinem Wertebereich direkt mit dem SPI und SPEI vergleichbar ist. Der standardisierte Grundwasserindex SGI (*Standardized Groundwater level Index*) wurde nach BLOOMFIELD UND MARCHANT (2013) berechnet. Es wurden jeweils fünf Verteilungen (Log-logistisch, Log-Normal, Weibull, Pearson III und GEV) mittels der AIC (*Akaike information criterion*) getestet. Generell waren die Unterschiede zwischen den Verteilungen sehr gering. Die Pearson III-Verteilung erreichte am häufigsten die besten Anpassungsergebnisse für den SSI. Für den SGI war es die Log-Normal-Verteilung. Die Berechnungen wurden mit dem R-Package SCI durchgeführt.

4.4 Bodentrockenheit

Zur Charakterisierung der Bodentrockenheit wird der Bodenfeuchteindex (SMI) verwendet, der im Rahmen des Dürremonitors des UFZ berechnet wird (siehe Abschnitt 3.2). Die fünf Trockenklassen des SMI (Tabelle 2) werden hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklung im Oberboden (SMI_{Ober}, bis 0,25 m Tiefe) und in der gesamten Bodenschicht (SMI_{Ges} bis ca. 1,8 m Tiefe) für den Zeitraum 1951 bis 2017 analysiert. Hierbei wird

- zum einen die Auftretenshäufigkeit der fünf SMI Klassen für verschiedene Vergleichs- und Bezugszeiträume und
- zum anderen Dürreperioden unterschiedlicher Andauer (3/6/12/24 Monate) ausgewertet.

Liegt der SMI-Wert zum Beispiel im Zeitraum Jan 2002 bis Juni 2002 unter 0,3, so liegen vier 3-monatige (Jan–Mär, Feb–Apr, Mär–Mai, Apr–Jun) und eine 6-monatige Dürreperiode(n) der ‚Vorwarnstufe‘ vor.

Beginn und Ende der Dürrestufen werden anhand ihrer Klassengrenzen definiert, wie Abbildung 8 verdeutlicht.

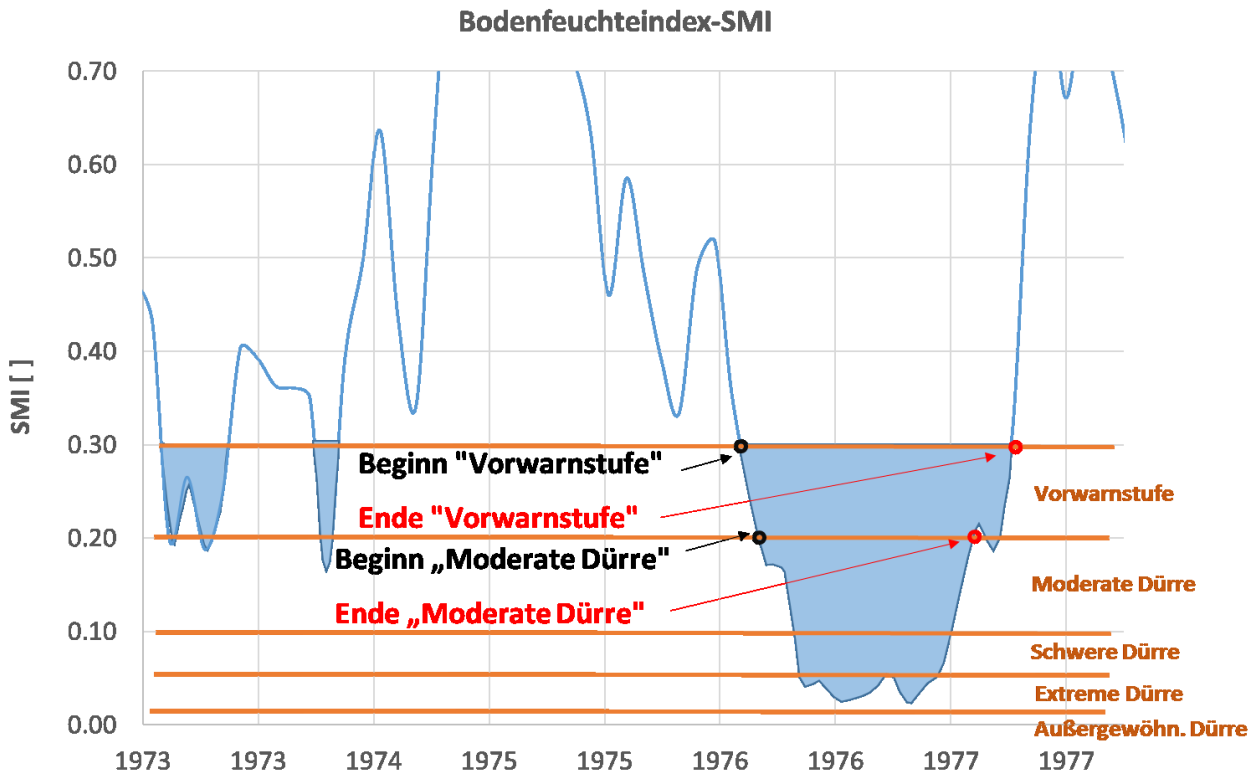


Abbildung 8: Definitionen für Beginn und Ende von Dürreperioden der Klasse „Vorwarnstufe“ und „Moderate Dürre“, exemplarisch für eine 4 x 4 km Gitterzelle

4.5 Validierung der Trockenindizes

4.5.1 Validierung der einzelnen Trockenindizes

Eine unabhängige Plausibilisierung bzw. Validierung der Ergebnisse der Trockenheitsuntersuchungen auf Stations-ebene wird mittels des Vegetationsindex NDVI und des Bodenfeuchteindex SMI auf verschiedenen Zeitskalen (3 bis 12 Monate) vorgenommen.

In Vorarbeiten von WU et al. (2010) und WANG et al. (2003) wurden enge Zusammenhänge innerhalb der Wachstumsperiode zwischen dem Niederschlag bzw. abgeleiteten Indizes und dem NDVI für Grasland und andere Landbedeckungen in China und den USA gefunden. Dagegen fanden LOTSCH et al. (2003) in einer globalen Studie kaum Hinweise auf niederschlagsinduzierte NDVI Anomalien in Europa.

Die Bodenfeuchte verbindet entscheidende Klimavariablen wie Niederschlag, Temperatur, Sonneneinstrahlung, etc. mit Fitness/ Produktivität der Pflanzen. Die Temperatur hat darüber hinaus einen direkten Einfluss auf Phänologie und Pflanzenwachstum. Ein klarer Zusammenhang zwischen den Trockenindizes und dem SMI ist somit zu erwarten.

Stationsweise wurden die monatlichen Werte von SPI, SPEI und RDI innerhalb der Wachstumsperiode mit dem NDVI, dem SMI des Gesamtbodens und dem SMI des Oberbodens korreliert. Die Wachstumsperiode wurde basierend auf den NDVI-Werten definiert als die Zeit zwischen Mai bis Oktober (siehe Abschnitt 5.4.1).

Es wurden verschiedene zeitliche Aggregationen (1–6, 9, 12 Monate) und zeitliche Verschiebungen (englisch: lag; 0 - 4 Monate) der Trockenindizes berücksichtigt. So wurde beispielsweise untersucht, wie der Augustwert des NDVI korreliert:

- mit SPI August (Aggregation=1, lag=0),
- mit SPI Juli und August (Aggregation=2, lag=0),
- mit SPI Juli (Aggregation=1, lag=1) etc.

Des Weiteren wurden die Mittelwerte des NDVI und des SMI der Wachstumsaison mit den Trockenkennwerten der Aggregationsstufen 6–12, 18, 24 ohne zeitliche Verschiebungen korreliert.

In Abbildung 9 sind die Flächen visualisiert, an denen der NDVI (16 1 x 1 km² Rasterzellen) und der SMI (eine 4 x 4 km² Rasterzelle) aus den Rastern extrahiert wurden. Die Flächen liegen nicht direkt an den Stationen, da der versiegelte Anteil an den Klimastationen meist zu hoch war. Vielmehr wurden in der Nähe liegende Standorte gewählt, die eine örtlich typische Verteilung natürlicher Landnutzungen aufweisen.

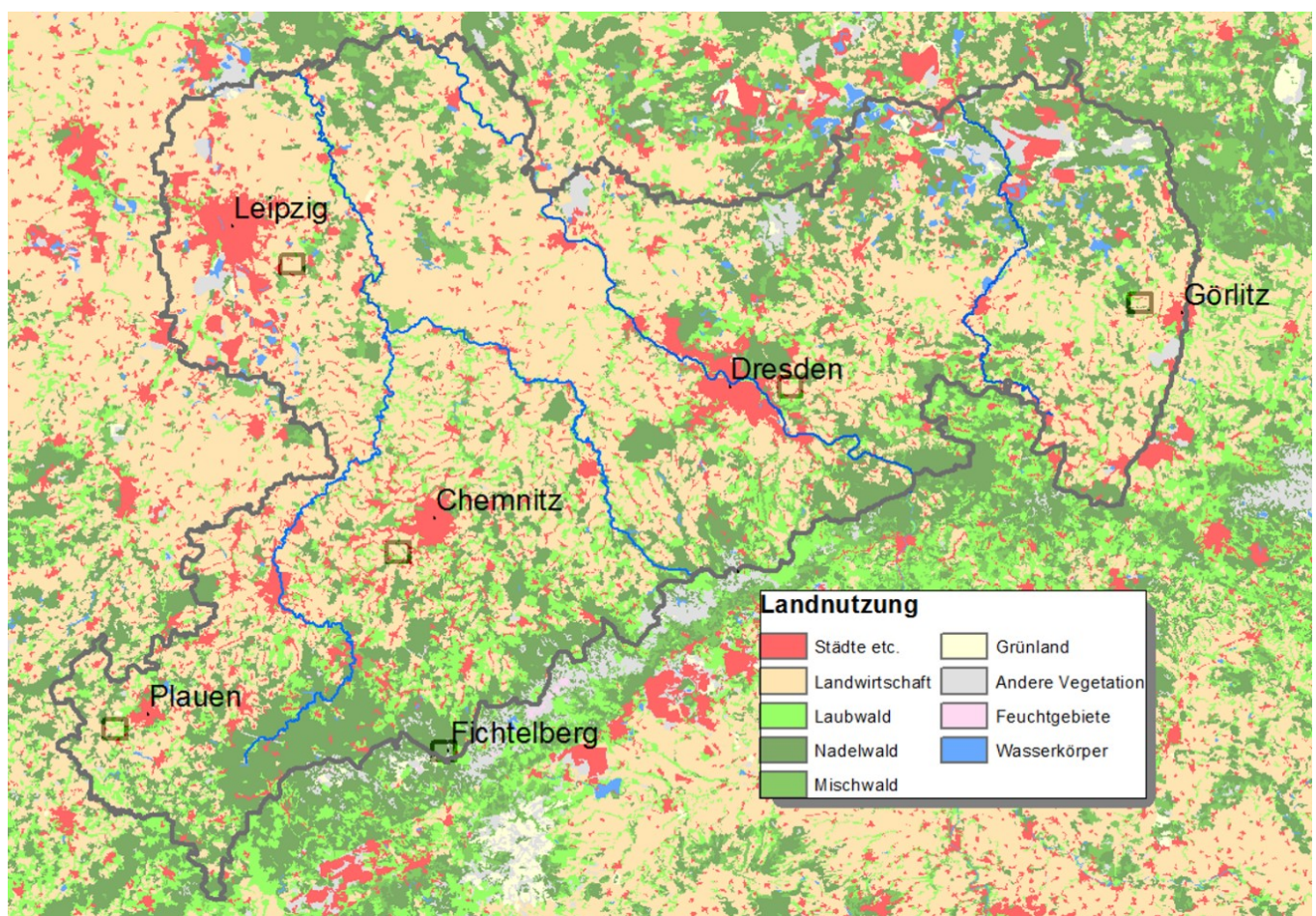


Abbildung 9: Landnutzung und Flächen (graue Rechtecke), an denen der NDVI aus den MODIS Daten und die SMI Daten aus dem Deutschlandraster extrahiert wurden.

4.5.2 Validierung von Kombinationen von Trockenindizes

Untersuchungen haben gezeigt, dass SPI und SPEI nicht gleichermaßen plausible Ergebnisse für einzelne Regionen liefern. Darüber hinaus hat sich die Differenz zwischen SPEI und SPI in den letzten Jahrzehnten verändert. Der markante Temperaturanstieg seit den 1990er Jahren führt zu erhöhten Verdunstungen und somit größerem Dürrestress (weitere Details in Abschnitt 5.1).

Es wird untersucht, ob eine Kombination von Indizes plausible Ergebnisse als die Einzelindizes liefern kann. Für die Zeitskalen 3, 6, 12 und 24 Monate (die als typisch gelten für Landwirtschaft, Hydrologie und Grundwasser) werden drei Ansätze getestet.

Ansatz 1

Es werden die Korrelationen zwischen dem SMI und den Einzelindizes (SPI, SPEI, RDI) sowie Kombinationen dieser analysiert. Zum einen werden die Indizes arithmetisch und zum anderen gewichtet gemittelt (basierend auf Erfahrungen aus der Korrelationsanalyse: 30% SPI, 60% SPEI, 10% RDI). Mittels einer Multiplen Linearen Regression MLR soll aufgezeigt werden, wie stationspezifisch die Koeffizienten und die Korrelationen ausfallen.

Ansatz 2

Das Potential einer MLR wird näher beleuchtet: Es werden die maßgebenden Prädiktoren (Trockenindizes) zur Abbildung des NDVI bzw. des SMI stationsweise bestimmt. Getrennt für den Gesamt- und den Oberboden wurde der SMI für das Gesamtjahr, SHJ und WHJ analysiert. Es wurden Teildatensätze für den SMI erzeugt, indem Daten unterhalb der SMI-Schwellwerte 0.5, 0.3, 0.2, 0.1 und 0.05 selektiert wurden. Zu den jeweiligen Zeitpunkten wurden die Trockenindizes ebenfalls selektiert. Für den NDVI erfolgte eine Analyse für die einzelnen Monate zwischen Mai und Oktober und das Mittel dieser Periode.

Der MLR wurde vorgegeben aus den zur Verfügung stehenden Prädiktoren maximal 3 Prädiktoren zu verwenden (als auto bezeichnet). Das adjustierte Bestimmtheitsmaß wurde als Gütekriterium bei der Auswahl der Prädiktoren genutzt. Im Ergebnis unterschieden sich diese je nach Station und Bezugsperiode. Um einen allgemeingültigen, für Sachsen einheitlichen Ansatz zu finden, wurden Prädiktoren identifiziert, die für alle Stationen relevant sind. Hierbei wurde auf die Häufigkeit des Vorkommens der Kennwerte geachtet sowie das unterschiedliche Aggregierungszeiträume berücksichtigt werden. Die drei identifizierten gemeinsamen Prädiktoren wurden für den Aufbau einer weiteren MLR (als manual bezeichnet) verwendet.

Ansatz 3

Hierbei handelt es sich um einen flächenhaften Ansatz unter Nutzung der 1 x 1 km² Rasterdaten des Niederschlages, der potentiellen Verdunstung sowie der 4 x 4 km² Rasterdaten des SMI. Der Bodenfeuchteindex wird hierbei als Referenz betrachtet; als Bindeglied zwischen den meteorologischen Einflüssen und den Auswirkungen auf Land-, Forst- und Wasserwirtschaft. Auf der Suche nach einer Regressionsbeziehung mit einheitlichen Prädiktoren zur Abbildung der Bodentrockenheit, wurde für jede Rasterzelle die maximale Korrelation zwischen dem SMI (getrennt für Ober- und Gesamtboden) und dem SPEI verschiedener Aggregierungsstufen für den Zeitraum 1961–2018 ermittelt. Die am häufigsten vorkommenden Aggregierungsstufen des SPEI wurden für den Aufbau einer MLR für die Rasterzellen genutzt. Die ermittelten Koeffizienten der MLR werden abgespeichert und können nachfolgend für Analysen oder Prognosen genutzt werden.

4.6 Einfluss von Starkniederschlag auf Trockenheitsindizes

BERNHOFER et al. (2017) haben gezeigt, dass die höheren sommerlichen Niederschlagssummen in Sachsen einen zunehmenden Starkregenanteil aufweisen, woraus längere trockene Abschnitte zwischen den Starkregen-Ereignissen folgen. Die Berechnung der Indizes SPI, SPEI und RDI geschieht auf Basis von Monatssummen. Ein trockener Monat kann durch ein einzelnes Starkregenereignis bei der Indexberechnung wie ein normaler Monat erscheinen. Doch was geschieht wirklich? Die Infiltrationskapazität des Bodens ist begrenzt. Bei starken Regenfällen kann nicht sämtliches Wasser versickern, es läuft bei Gefälle oberflächlich ab. Faktoren dieses Prozesses sind zum einen eine mögliche Hydrophobie des Bodens: der Boden kann nach längeren Trockenperioden wasserabweisend werden. Zum anderen kann durch große Regentropfen (z. B. bei sommerlichen Gewittern) bei ungenügender Pflanzenbedeckung (z. B. durch vertrocknete Pflanzen) der Boden verschlämmt werden. Dabei wird die Bodenstruktur zerstört und feine Bodenpartikel „verstopfen“ die Poren des Bodens, weshalb das Wasser schlechter versickert. Sichtbar werden solche Ereignisse durch Erosion von Boden. Ein weiterer Effekt ist die Entstehung von bevorzugten Fließbahnen bei längeren Trockenperioden, wobei versickerndes Wasser einen Großteil der oberen Bodensäule passiert ohne diese entsprechend zu befeuchten (GIMBEL et al. 2016).

Für den Bodenwasserhaushalt bewirkt die Zunahme des oberflächlichen Direktabflusses eine Abnahme der anderen Wasserflüsse. Weniger pflanzenverfügbares Wasser im Boden schränkt die Evaporation und die Transpiration der Pflanzen ein. Letzteres kann zu Trockenschäden führen.

Ansatz 1

Vor diesem Hintergrund wird versucht, diesen Effekt mit Beobachtungs- und Modelldaten zu belegen. Hierzu werden die monatlichen Daten des Bodenfeuchteindex SMI zusammen mit dem berechneten SPI und SPEI und den täglichen Starkniederschlagssummen analysiert.

Ansatz 2

Das Standortwasserhaushaltsmodell „Brook90 for R“³ wird angewendet, um die Wasserflüsse höher aufgelöst (täglich) zu quantifizieren und somit Wechselwirkungen zwischen Trockenheit und Starkniederschlägen nachzugehen.

Weitere Details zu den Ansätzen sind im Abschnitt 5.5 zu finden.

³ Brook90 for R (KRONENBERG & OEHLISCHLÄGEL 2019) ist eine für die Programmierumgebung R umgeschriebene Version von Brook 90 (FEDERER 2002). Es ist ein hydrologisches Modell, welches die Prozesse der Verdunstung und des Wassertransportes im Boden prozessbasiert modelliert.

5 Ergebnisse

Die Abbildungen und Karten des Berichtes stehen digital auf der beigefügten DVD zu Verfügung. Darüber hinaus sind für weitere Perioden und Jahreszeiten Abbildungen und Karten sowie die Grid-ASCII Dateien abgelegt.

5.1 Indizes meteorologischer Trockenheit

5.1.1 Mittlere Indexwerte

Der Verlauf der über den Freistaat Sachsen hinweg gemittelten Indexwerte ist für alle sechs Zeitskalen des SPI in Abbildung 10 dargestellt. Die besonders trockenen Phasen Anfang der 1960er Jahre, um 1976, zu Anfang der 1980er, um 1990 sowie um das Jahr 2003 herum zeichnen sich deutlich ab. Mit steigender Zeitskala wird der Zeitreihenverlauf immer mehr geglättet und es zeichnet sich ein Anstiegstrend der Jahresniederschlagssummen ab – insbesondere bei den Zeitskalen 12 und 24 Monate. Trotz der auf langen SPI-Zeitskalen im Mittel „zu nassen“ Bedingungen sind auf den kürzeren Zeitskalen sehr extreme Trockenheitsbedingungen aufgetreten – mit 11/2011 und 04/2007 die extremsten Trockenmonate in der Zeitreihe des SPI-Sachsenmittels. Daher lässt sich aus dem generellen Niederschlagsanstiegstrend kein grundsätzlich sinkendes Trockenheitsrisiko mit entsprechenden negativen Auswirkungen in den Klimafolgenbereichen ableiten.

Auch für die nassen Bedingungen wurden extreme Werte nach 2000 beobachtet und zwar im August 2010. Dass seit 2000 sachsenweit keine wesentlichen Trockenphasen auf langen Zeitskalen mehr aufgetreten sein sollen, deckt sich nicht mit den beobachteten Grundwasserdefiziten beispielsweise nach 2003. Dies verdeutlicht, dass die durch den SPI wiedergegebene Niederschlagsinformation allein unzureichend für die Bewertung von Trockenheit ist. Mittels des in Abbildung 11 dargestellten SPEI wird der Einfluss der Verdunstung mit einbezogen. Es stellt sich im Vergleich zum SPI ein leicht differenziertes Bild dar. Vor allem auf den längeren Zeitskalen wird eine deutliche Intensivierung trockener Bedingungen bei Verwendung des SPEI gegenüber dem SPI deutlich. Die in Sachsen angestiegenen Lufttemperaturen haben die potentiellen Trockenheitsbedingungen intensiviert.

Verlauf der über den Freistaat Sachsen hinweg gemittelter SPI

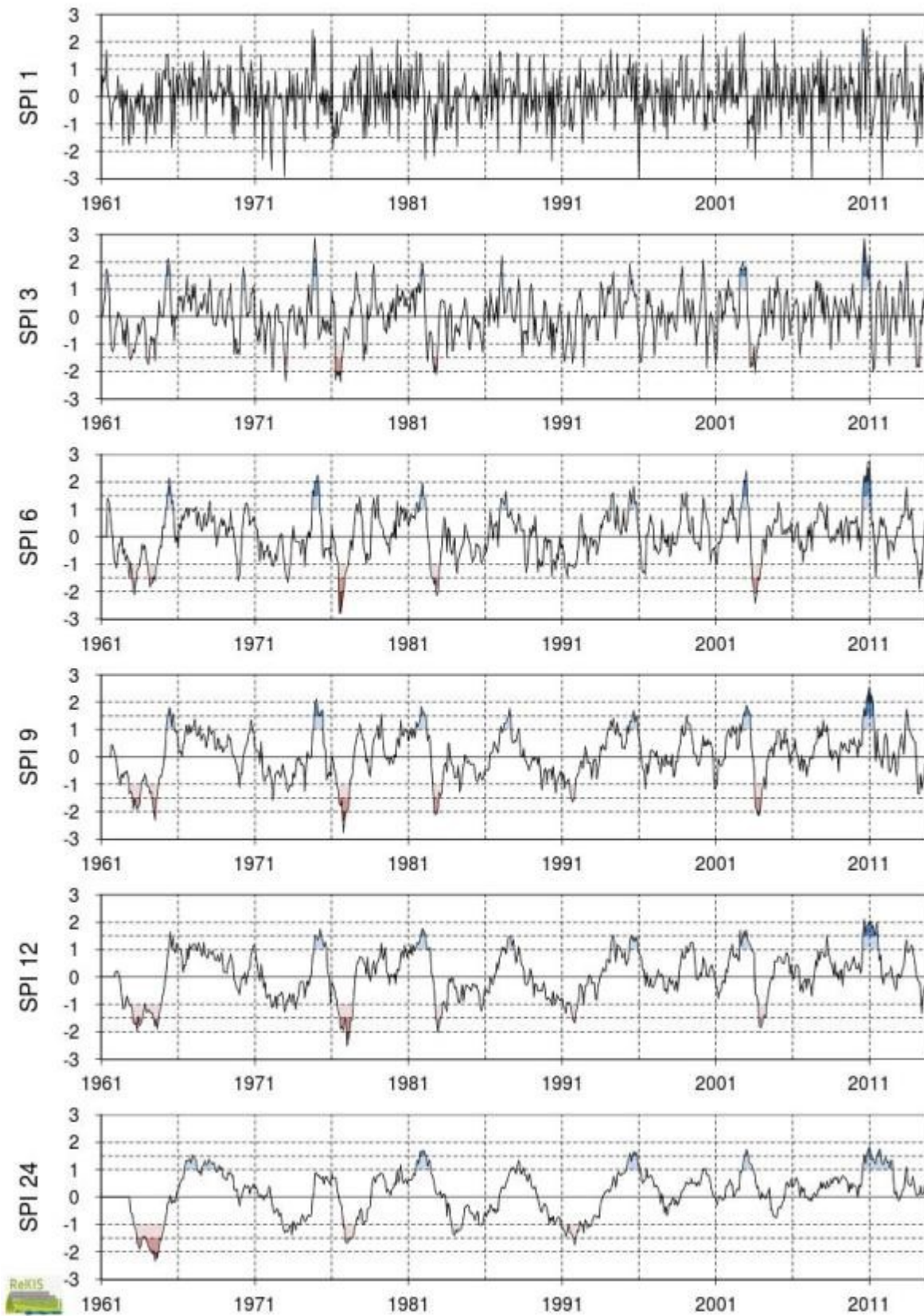


Abbildung 10: Zeitreihen des SPI-Flächenmittels für Sachsen auf unterschiedlichen Zeitskalen.

Verlauf der über den Freistaat Sachsen hinweg gemittelter SPEI

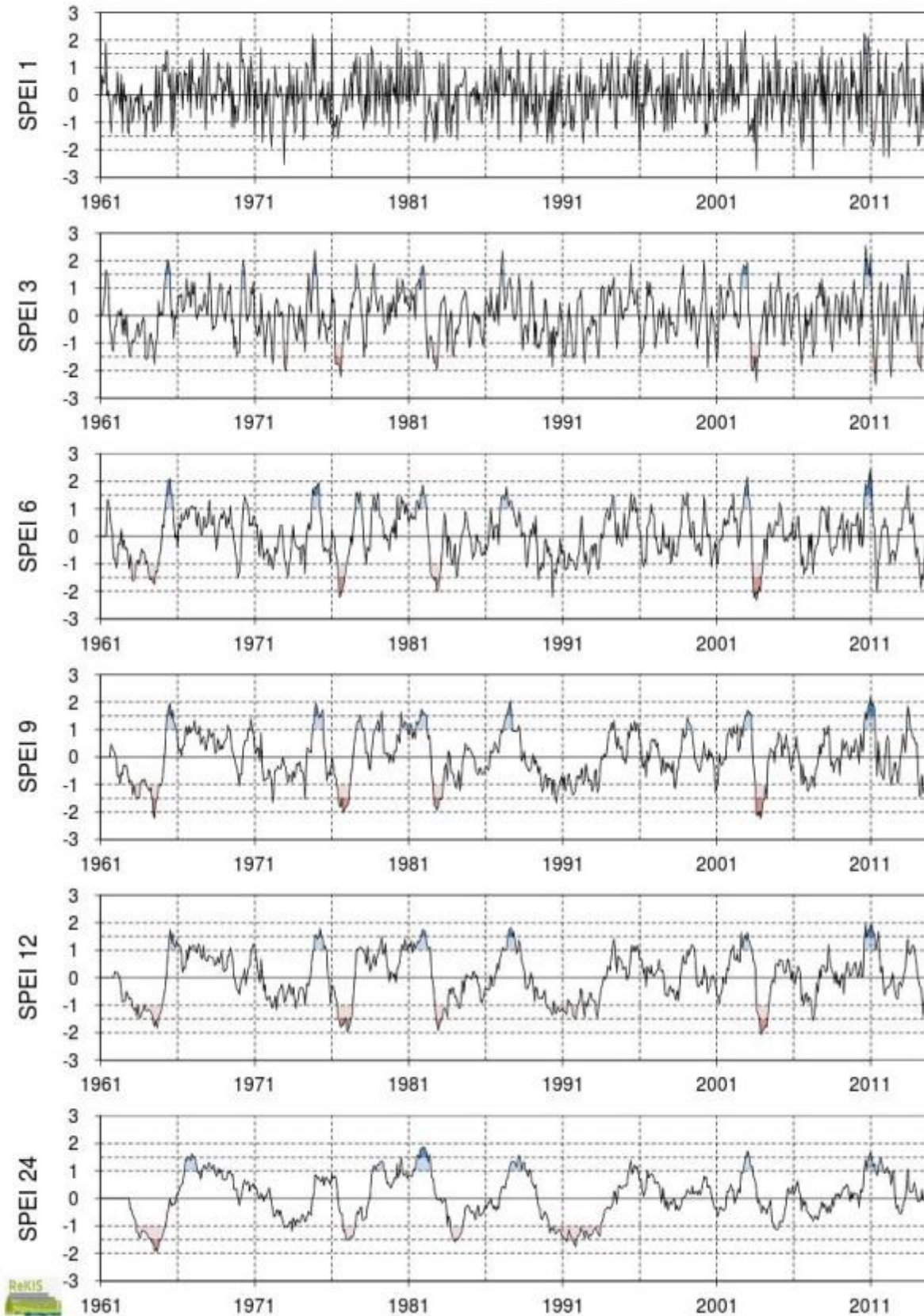


Abbildung 11: Zeitreihen des SPEI-Flächenmittels für Sachsen auf unterschiedlichen Zeitskalen.

In der Abbildung 12 werden die räumlichen Unterschiede der Differenz zwischen SPEI und SPI für die Zeitscheiben 1961–1990 und 1991–2014 veranschaulicht. Innerhalb des Zeitraumes 1961–1990 treten nur geringe Unterschiede zwischen den mittleren Indexwerten von SPI und SPEI im Winter- und Sommerhalbjahr auf. Im Zeitraum 1991–2014 unterscheiden sich die Indexmittelwerte dagegen deutlich. Steigende Lufttemperaturen verursachen über eine erhöhte Verdunstung eine sich stärker ausprägende Trockenheit – die SPEI Werte sind kleiner, d.h. die Differenz zum SPI wird größer (rot: hohe negative Differenz). Die Unterschiede sind im Raum Leipzig am größten; dort traten jedoch in der Zeitscheibe 1961–1990 Abweichungen in umgekehrter Richtung auf. Die Wahl des Trockenheitsindex hat im Sommerhalbjahr einen größeren Einfluss auf die Trockenheitsbewertung als im Winterhalbjahr, was auf die generell höhere Verdunstung in den Monaten des warmen Halbjahres zurückzuführen ist. Trotz der angestiegenen Wintertemperaturen sind die Verdunstungsraten immer noch so klein, dass sie im Mittel kaum einen Einfluss auf die Trockenheitsindexwerte haben.

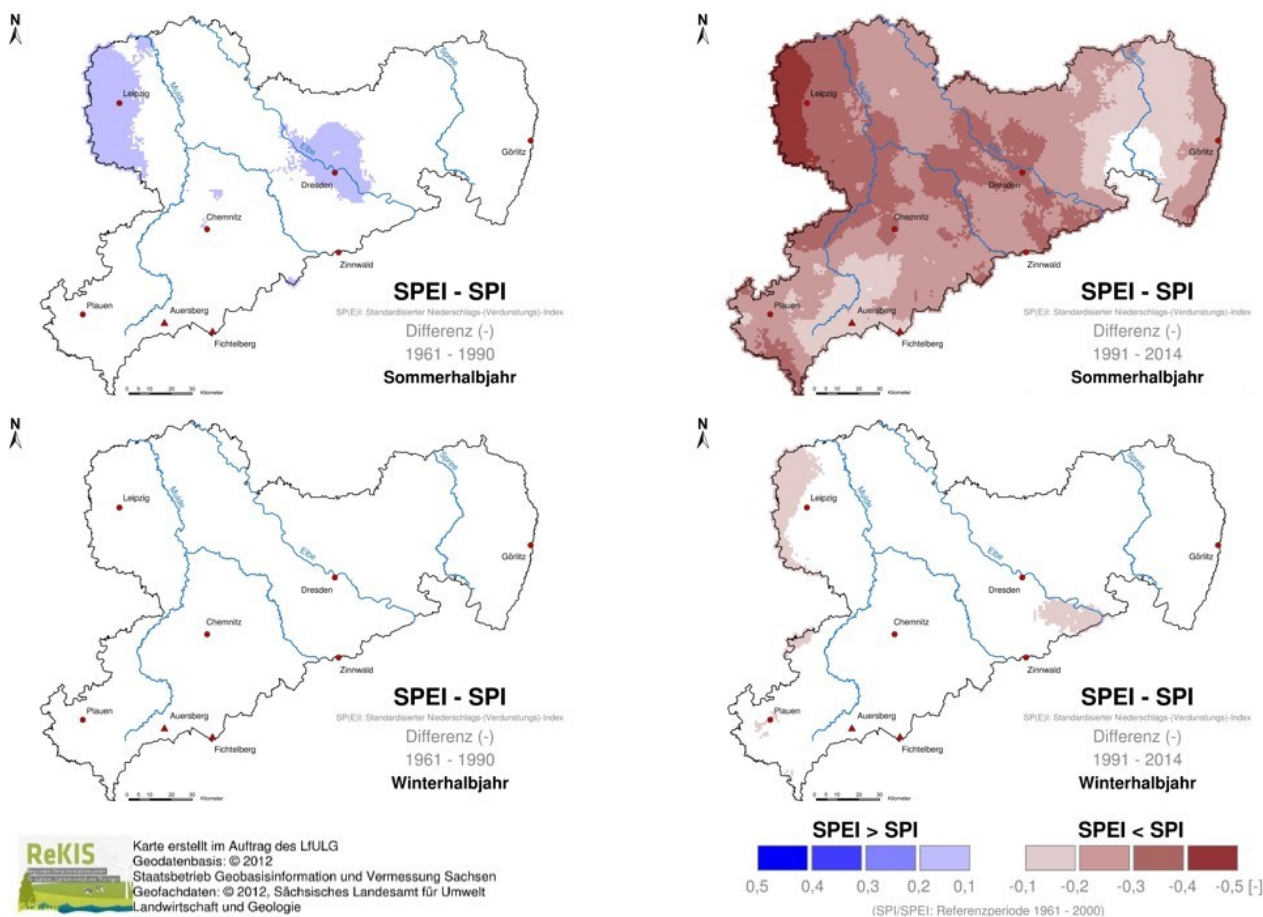


Abbildung 12: Karten der Differenz von SPEI-6 und SPI-6 für die Halbjahre im Vergleich der Zeitscheiben 1961–1990 (links) und 1991–2014 (rechts).

In den meisten Jahreszeiten ist es in Sachsen nasser geworden und zwar deutlich stärker unter Verwendung des SPI als unter Verwendung des SPEI (Abbildung 13). Ausgehend vom Niederschlag (SPI) wurden das Gesamtjahr, die Halbjahre, Sommer, Herbst und Winter feuchter. Lediglich im Frühjahr und in der um einen Monat verschobenen Vegetationsperiode I wurde es trockener. Unter Einbeziehung der potentiellen Evapotranspiration (SPEI) fällt der Trend hinzu feuchteren Bedingungen deutlich geringer aus und kehrt sich für das Sommerhalbjahr sogar um. Einen noch stärkeren Trend hinzu Trockenheit zeigen die Vegetationsperiode I und etwas abgemildert das Frühjahr. Grundsätzlich bestätigen diese Ergebnisse die bisherigen Niederschlagsanalysen für Sachsen (HÄNSEL et al. 2015 und BERNHOFER et al. 2015a).

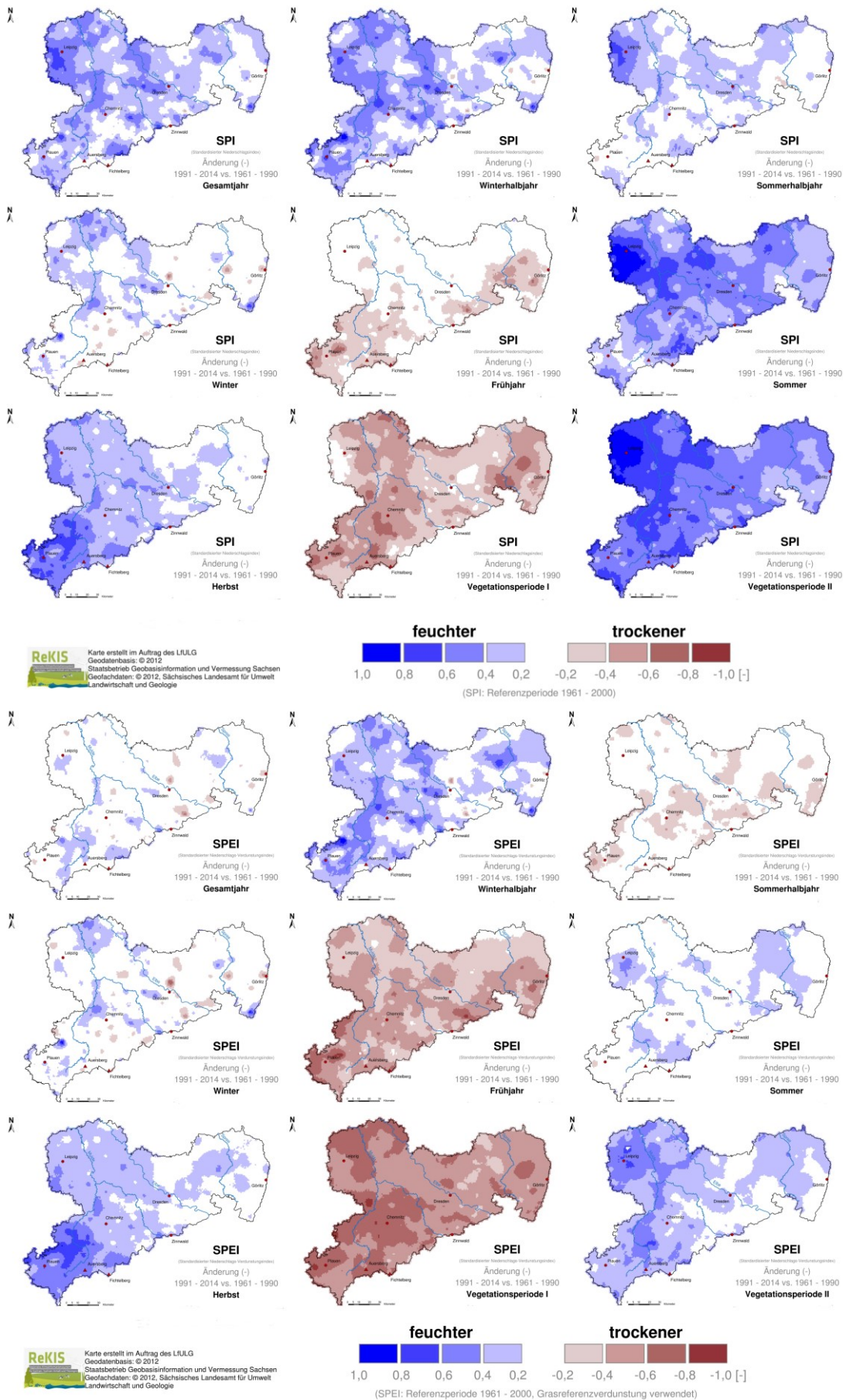


Abbildung 13: Differenzkarten (1991–2014 vs. 1961–1990) des SPI (oben) und SPEI (unten) für ausgewählte Jahreszeiten

5.1.2 Häufigkeit, Dauer, und Schweregrad von Trockenperioden

Häufigkeit und Andauer von Trockenperioden für die Indizes SPI und SPEI (unter Berücksichtigung dreier verschiedener Ansätze zur Verdunstungsberechnung) sind in Abbildung 14 auf jeweils sechs Zeitskalen für das Sachsenmittel dargestellt. Diese Abbildung zeigt prinzipiell ähnliche Trockenheitsmuster für die unterschiedlichen Berechnungsansätze. Auf den kurzen Zeitskalen treten häufig kurze Trockenperioden auf. Bei längeren Zeitskalen werden die Trockenperioden seltener, dafür länger. Zudem ist eine zeitliche Verschiebung des Einsetzens von Trockenperioden mit ansteigender Wirkungszeitskala sichtbar. Die bereits beschriebenen Zeitabschnitte besonders trockener Bedingungen Anfang der 1960er, 1970er, und 1980er sowie 1976/77, 1988–1993 und 2003 treten besonders hervor. Zudem sind Differenzierungen in der Intensität der aufgetretenen Trockenperioden durch die zusätzliche Darstellung starker Trockenphasen (Indexwerte $< -1,5$) sichtbar.

Die mittlere Dauer der Trockenperioden hat auf allen Zeitskalen abgenommen – insbesondere auf den langen Wirkungszeitskalen (Analysezeitraum 1961–2014). Nach der langandauernden Trockenperiode Ende der 1980 bis Anfang der 1990er Jahre sind keine langen Trockenperioden mehr aufgetreten (Bemerkung: Die trockenen Jahre 2018 und 2019 wurden hier noch nicht berücksichtigt). Dagegen sind starke Trockenphasen vor allem auf den kurzen Zeitskalen (wo die jahreszeitliche Differenzierung noch stärker zum Tragen kommt) auch nach 1990 noch mehrfach aufgetreten.

Vergleich der Andauer Trockenperioden bezogen auf den SPI und SPEI unter Berücksichtigung verschiedener Verdunstungsansätze
Referenzperiode 1961 bis 1990

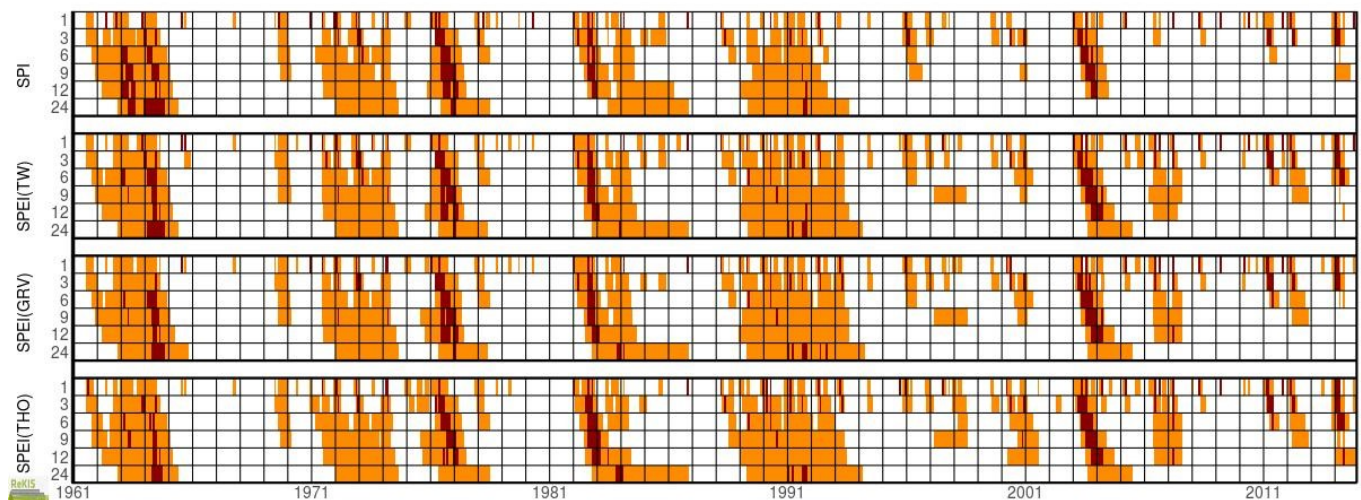
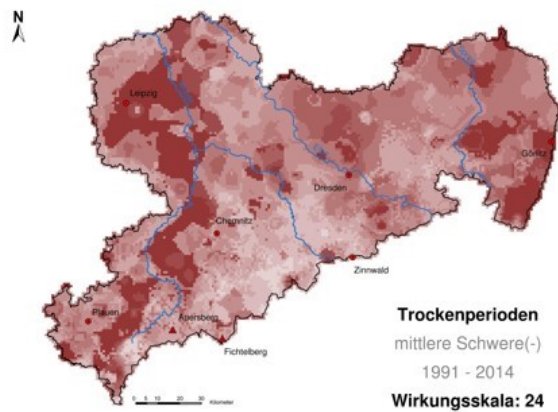
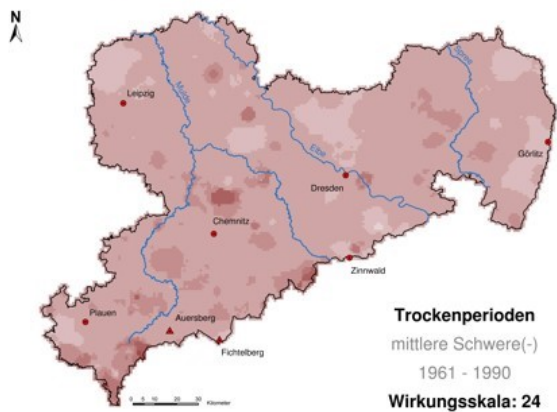
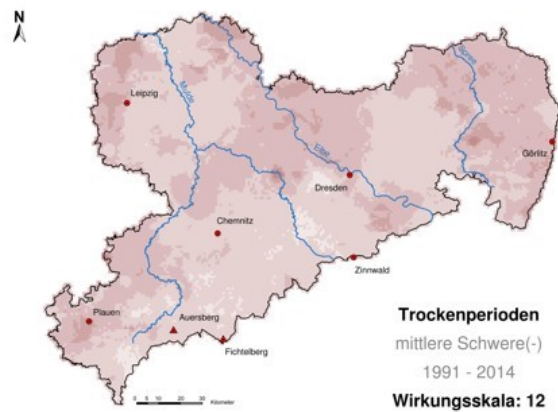
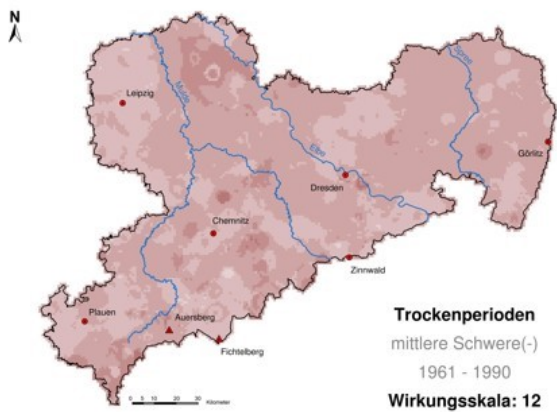
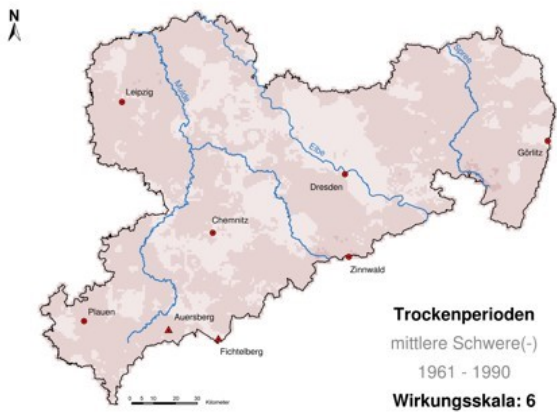
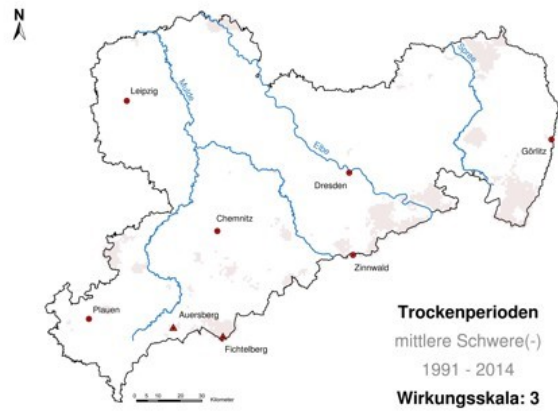


Abbildung 14: Andauer von Trockenperioden (Sachsenmittel) basierend auf dem SPI sowie dem SPEI unter Einbeziehung dreier Schätzer der potentiellen Evapotranspiration für sechs verschiedene Zeitskalen (1, 3, 6, 9, 12 und 24 Monate). Moderate Trockenperioden (SPEI < 0 und mind. einmal im Verlauf der Trockenperioden < -1) sind orange und starke Trockenphasen (SPEI dauerhaft $< -1,5$) sind rot gekennzeichnet.

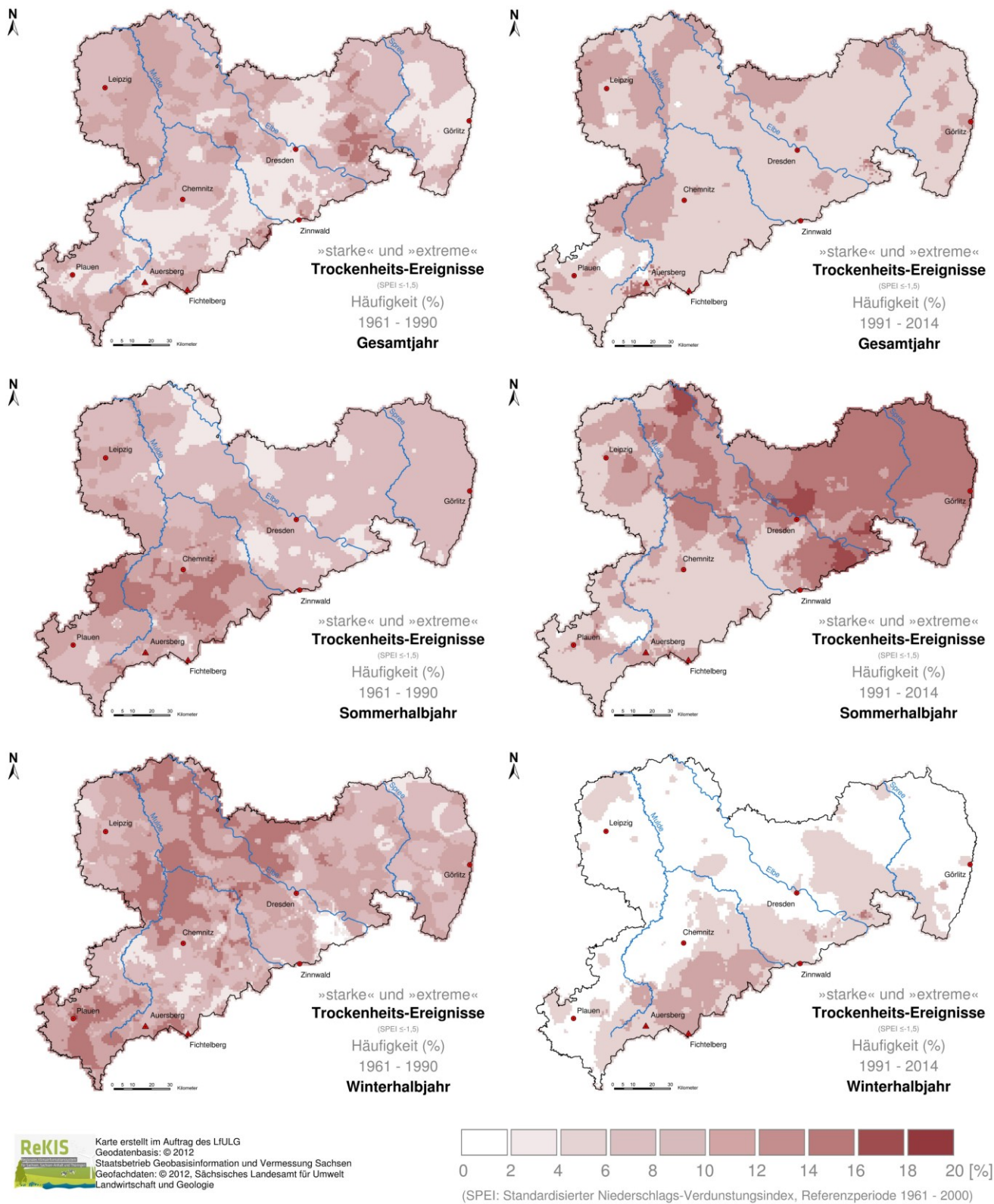
Eine Veranschaulichung der mittleren Intensität von Trockenperioden ist der Abbildung 15 zu entnehmen. Hierbei ist über alle Zeitskalen (mit Ausnahme von 24 Monaten) ein deutlicher Rückgang in der Intensität über Sachsen in 1991–2014 gegenüber 1961–2014 sichtbar. Die Interpretation der 24-Monatszeitskala wird durch die Zeitscheibenübergreifende Trockenperiode Ende der 1980er bis Anfang der 1990er Jahre erschwert. Diese auf Trockenperioden basierenden Karten verwischen aufgrund des jahreszeitenübergreifenden Charakters von Trockenperioden eventuelle jahreszeitliche Unterschiede in der Entwicklung der Trockenheitsintensität. Daher wird zusätzlich die Häufigkeit von starker und extremer Trockenheit (SPEI $< -1,5$) in den Zeitscheiben 1961–1990 und 1991–2014 für die (Halb-) Jahre (Abbildung 16) gegenübergestellt. Für das Sommerhalbjahr ist eine deutliche räumliche Differenzierung zu erkennen. Während intensive Trockenheit im Zeitraum 1961–1990 im Südwesten Sachsens recht häufig auftrat, war dies in der Zeitscheibe 1991–2014 in Nordostsachsen der Fall. Im Winterhalbjahr kamen intensive Trockenheiten vor 1990 häufiger vor als danach. Nur im Bereich des Erzgebirges ist die Häufigkeit nach 1990 in etwa gleichgeblieben bzw. leicht angestiegen. Dafür verantwortlich sind die Bedingungen im Frühling bzw. in der Vegetationsperiode I; in der aktuellen Periode ist eine deutliche Häufung von schwerwiegenden bis extremen Trockenzeiten zu beobachten (Anlage 3).



ReKIS Karte erstellt im Auftrag des LfULG
Geodatenbasis: © 2012
Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen
Geofachdaten: © 2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt
Landwirtschaft und Geologie



Abbildung 15: Karten der mittleren Intensität (Schwere) von moderaten SPEI-Trockenperioden (SPEI < 0 und mindestens einmal im Verlauf der Trockenperiode < -1,0) in den Zeiträumen 1961–1990 (links) und 1991–2014 (rechts).



ReKIS Karte erstellt im Auftrag des LfULG
 Geodatenbasis: © 2012
 Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen
 Geofachdaten: © 2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt
 Landwirtschaft und Geologie

Abbildung 16: Karten der Häufigkeit von schwerwiegender bis extreme Trockenheit (Unterschreitungshäufigkeit eines SPEI-Wertes von -1,5) für das Jahr (SPEI-12 für Dezember) und die Halbjahre (SPEI-6 für März und September) für die Zeitscheiben 1961–1990 (links) und 1991–2014 (rechts).

5.1.3 Räumliche Ausdehnung von Trockenperioden

Die räumliche Ausdehnung von Trockenheit hat über den gesamten Freistaat gemittelt zwischen 1961 und 2014 auf nahezu allen Zeitskalen – insbesondere jedoch auf den längeren Zeitskalen ab 6 Monaten – abgenommen (Abbildung 17). Dabei spielt es kaum eine Rolle, welcher Index-Schwellenwert zur Bestimmung der Trockenheitszustände verwendet wird. Einzig auf der Zeitskala von einem Monat ist die räumliche Ausdehnung von Trockenheit nahezu konstant geblieben.

Während die bisherigen Abbildungen den von Trockenheit betroffenen Flächenanteil Sachsens zeitlich gleitend darstellen und somit keine jahreszeitliche Differenzierung erlauben, sind die in Jahresauflösung aufgeschlüsselten Flächenanteile für die Jahreszeiten in Abbildung 18 für den SPI dargestellt. Die drei trockensten Jahre im Freistaat waren 1982, 2003 und 1976 mit leichten Variationen in ihrer Rangfolge je nach gewähltem Index (SPI vs. SPEI) und der gewählten Identifikationsmethode (Flächenmittelwert vs. Flächenanteil unterhalb bestimmtem Schwellenwert). Dabei war das Jahr 1982 in der Vegetationsperiode II und im Herbst besonders trocken und das Jahr 1976 im Frühjahr und Sommer. Der Sommer 2003 erreichte in keiner der betrachteten Perioden den Spitzenplatz (Ausnahme: Flächenanteil extremer Trockenheitsbedingungen für den SPEI). Im Winter liegt 2013/14 an erster Position. Vergleicht man die Zeiträume bis 1990 und ab 1991, so fällt eine starke Betroffenheit in der VP I und im Frühjahr in der aktuellen Periode auf. Im Winter ist der Anteil betroffener Flächen in etwa gleichgeblieben, in den übrigen Jahreszeiten nahmen die Flächenanteile ab.

Verlauf der von Trockenheit betroffenen Fläche in Sachsen gemäß SPEI

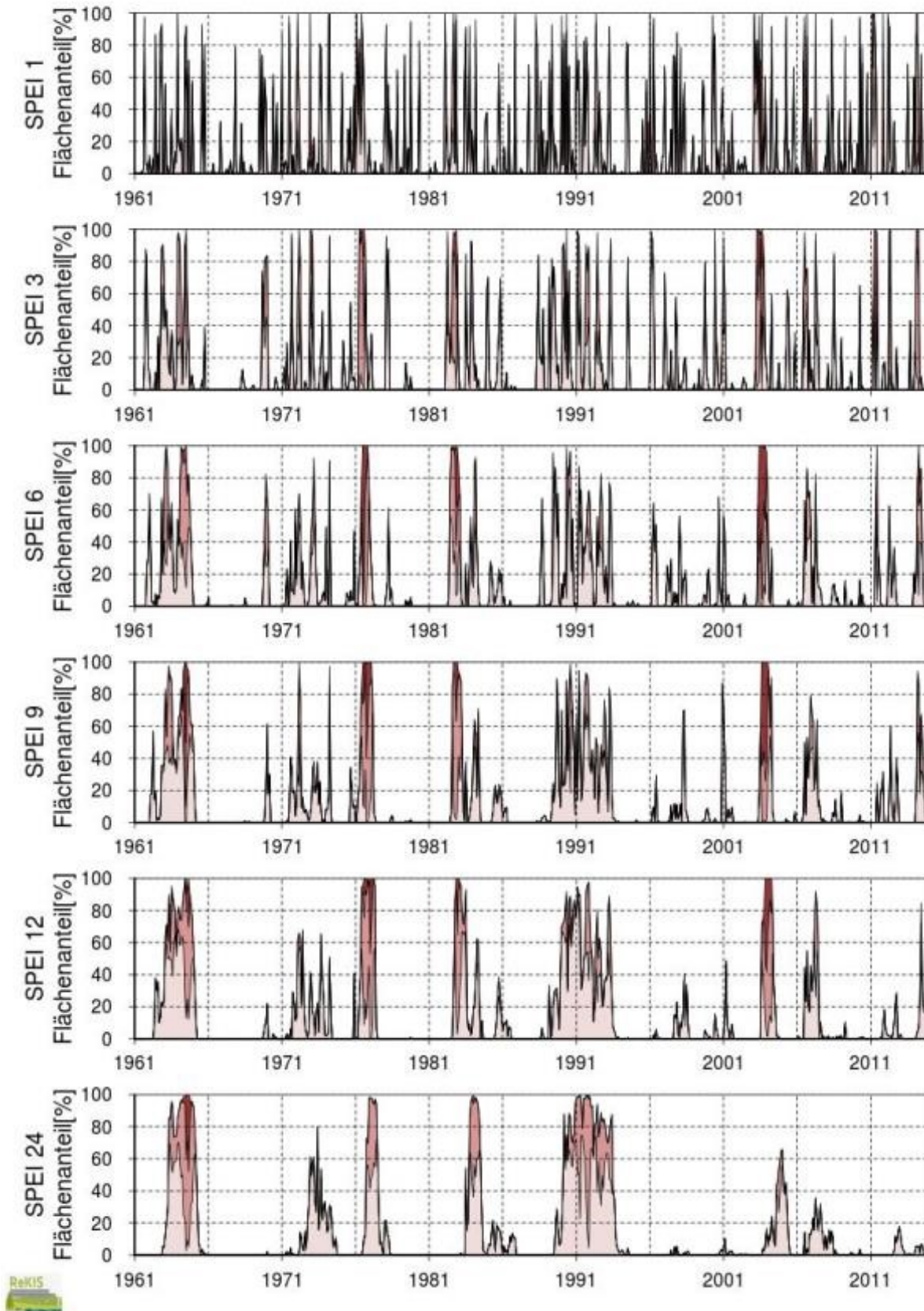


Abbildung 17: Zeitreihen des als moderat (SPEI < 1,0; hellrosa), stark (SPEI < 1,5; rosa) und extrem trocken (SPEI < 2,0; dunkelrot) klassifizierten Flächenanteils von Sachsen auf verschiedenen Zeitskalen; Referenzperiode: 1961–2000; Ansatz Potentielle Verdunstung: Grasreferenzverdunstung.

Von Trockenheit betroffenen Fläche in Sachsen gemäß SPI

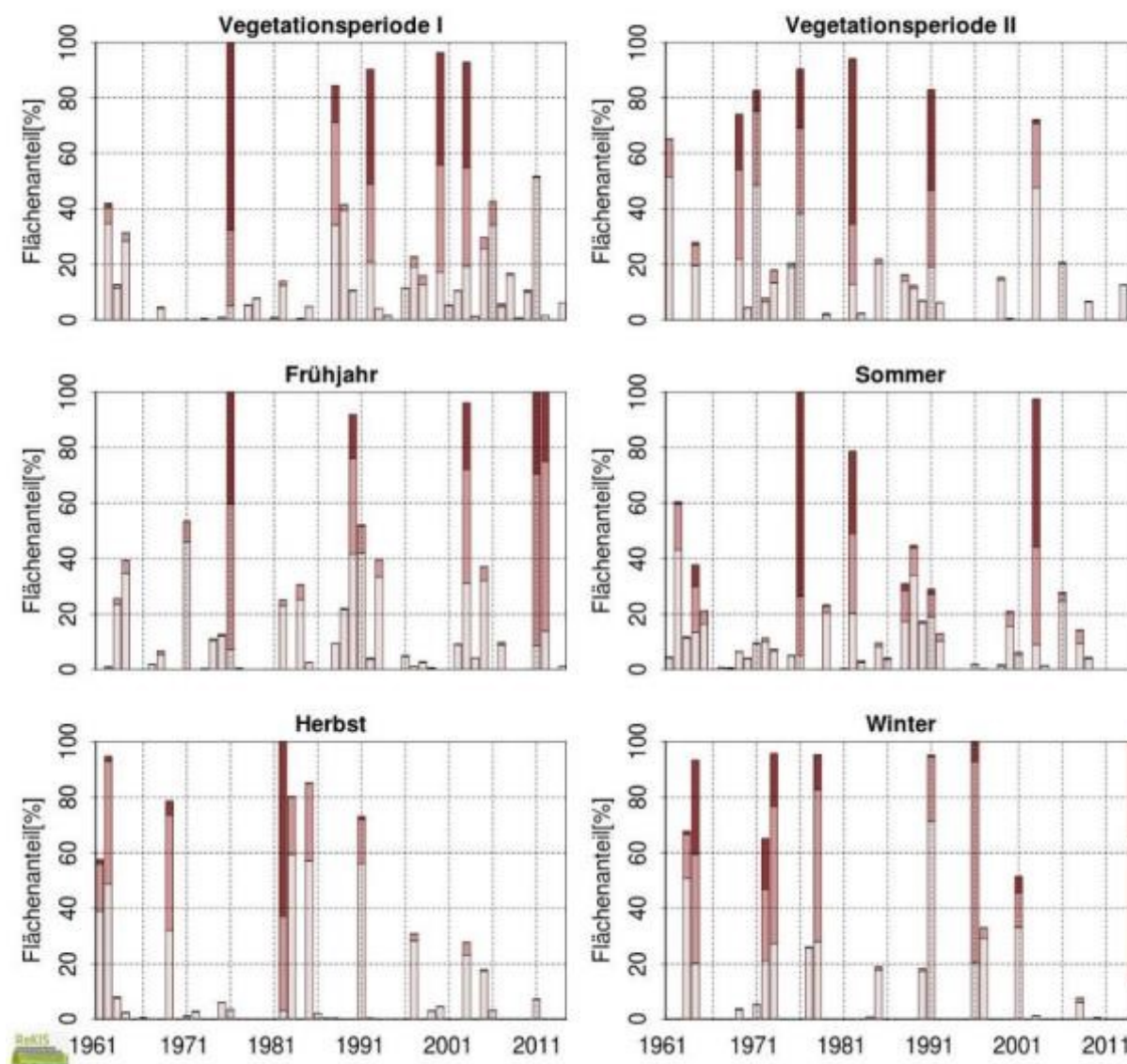


Abbildung 18: Zeitreihen des als moderat (Index < 1,0; hellrosa), stark (Index < 1,5; rosa) und extrem trocken (Index < 2,0; dunkelrot) trocken klassifizierten Flächenanteils von Sachsen mittels SPI für die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden (jeweils Wirkungszeitskala von drei Monaten); Referenzperiode: 1961–2000.

5.1.4 Vergleich Reconnaissance-Dürreindex zu Standardisierter Niederschlagsindex und Standardisierter Niederschlags-Verdunstungsindex

Für die stationsweisen Analysen wurde neben SPI und SPEI der weit verbreitete Kennwert RDI hinzugenommen. Inwieweit dieser in der Identifikation von Trocken- und Feuchteperioden mit dem SPI und dem SPEI übereinstimmt, zeigt ein Vergleich der Periode 2013–2018 für Chemnitz, in der sowohl starke positive als auch negative Abweichungen von den normalen Feuchtigkeitsbedingungen auftraten (Abbildung 19). Für die Zeitskalen 1 und 3 Monate sind die Übereinstimmungen zwischen den drei Indizes groß. Ab 6 Monaten Aggregierungszeit werden extreme Feuchteperioden (z. B. Sommer 2013) vom RDI verstärkt, extreme Trockenperioden (z. B. Sommer 2018) dagegen deutlich abgeschwächt angezeigt. An tiefer gelegenen Stationen wie Dresden und Görlitz (nicht gezeigt hier) ist die Variabilität des RDI insgesamt geringer. Grund für dieses zeitabhängige Phänomen könnte die Wahl der Verteilungsfunktion sein (RDI 1–4: Log-Normal; RDI > 4: Weibull), die notwendig war, um eine zufriedenstellende Anpassung der Beobachtungswerte an eine Verteilung zu gewährleisten.

Meteorologische Indizes verschiedener Zeitskalen für Chemnitz

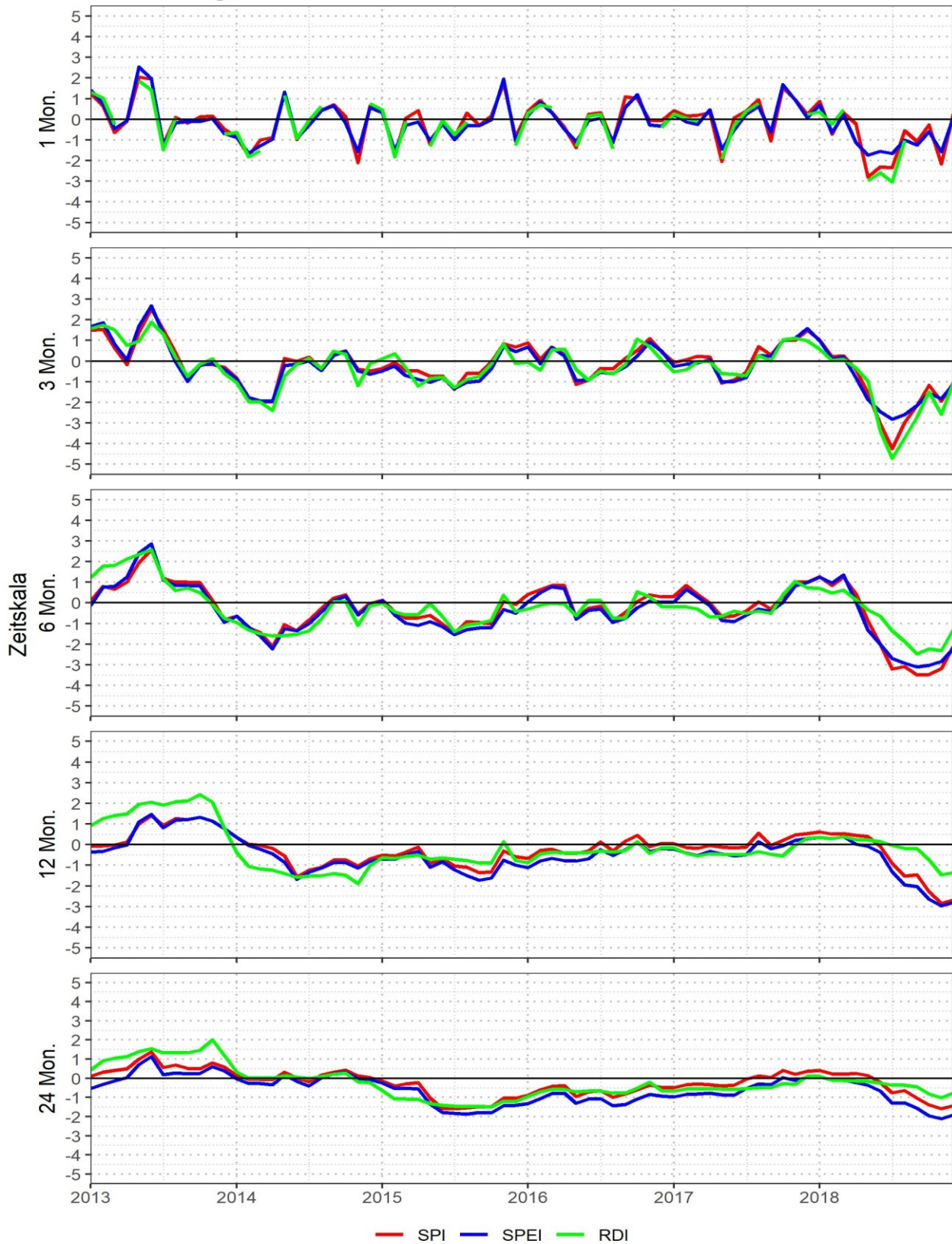


Abbildung 19: Vergleich der Indizes SPI, SPEI und RDI verschiedener Zeitskalen für Chemnitz in der Periode 2013–2018.

5.2 Impaktrelevanz des Standardisierten Niederschlagsindex und des Standardisierten Niederschlags-Verdunstungsindex

Auf Grundlage der für Sachsen flächig vorliegenden meteorologischen Informationen wurden Impaktanalysen bis einschließlich 2014 durchgeführt. Für die forstlichen Daten konnte die Datenbasis erweitert werden, womit das sehr heiße und trockene Jahr 2018 mit in die Betrachtungen einbezogen werden konnte. Hierfür wurde eine stationsweise Analyse durchgeführt. Hierfür wurden SPI und SPEI-Werte von sechs sächsischen Klimastationen berechnet und die SMI-Werte von Pixeln in der Nähe der Klimastationen verwendet (Details hierzu in Abschnitt 4.5.1). Da die forstlichen Impaktdata als Flächensummen für Sachsen vorliegen, wurde aus den meteorologischen Stationsdaten ein Flächenmittel für Sachsen mittels Thiessen-Polygon berechnet. Die Signifikanz der Korrelationen wird folgendermaßen gekennzeichnet:

- * signifikant (95%),
- ** sehr signifikant (99%) und
- *** hoch signifikant (99,9%).

5.2.1 Sektor Landwirtschaft

Analysen zur Impaktrelevanz von SPI und SPEI in Europa wurden von STAGGE et al. (2015) mit einem logistischen Regressionsmodell durchgeführt. Dabei wurden die für den Landwirtschaftssektor in der Datenbank EDII (*European Drought Impact Report Inventory*; STAHL et al. 2012) dokumentierten Trockenheitsauswirkungen verwendet. Für Regionen mit regenabhängiger Landwirtschaft (ohne künstliche Bewässerung) zeigen sich demnach die Auswirkungen von meteorologischer Trockenheit bereits auf geringen Zeitskalen von 2–3 Monaten; mit der größten Empfindlichkeit gegenüber Trockenheitsstress in den späten Frühjahrs- bzw. den Sommermonaten. Für Deutschland war der SPEI auf der 3-Monatszeitskala der beste Prädiktor für das Auftreten landwirtschaftlicher Trockenheitsauswirkungen. In Ländern mit geringeren Jahresniederschlagssummen, die stärker auf künstliche Bewässerung sowie Wasserspeicherung (z.B. in Form von Schnee, Böden mit hoher Wasserspeicherkapazität oder Grundwasserspeicherung) angewiesen sind, reagiert die Landwirtschaft dagegen eher auf länger andauernde Trockenheit von 9–12 Monaten.

Generell ist der SPEI etwas besser mit den beobachteten Dürreauswirkungen gekoppelt als der SPI. Noch gezieltere Einschätzungen der Trockenheitsbedingungen sind laut WANG et al. (2014) zu erwarten, wenn der SPEI auch den Bodenwasserhaushalt einbeziehen würde. Untersuchungen von POTOP et al. (2012) mittels SPEI für das Elbtal im Norden Tschechiens zeigten, dass die meisten untersuchten Gemüsepflanzen (Wurzel-, Kohl- und Knollengemüse) sehr empfindlich auf trockene Bedingungen reagieren. Bereits nach kurzen Trockenperioden ist mit Einbußen der Ernteerträge (Trockenheit zu Beginn der Wachstumszeit) oder der Qualität der Erzeugnisse (Trockenheit zu Ende der Wachstumszeit) zu rechnen. Als besonders trockenheitsanfällige Phasen identifizierte POTOP et al. (2012) den Zeitraum direkt nach der Anpflanzung und die drei letzten Wochen vor der Ernte.

Für die Korrelationsanalyse wurden SPI und SPEI über die Fläche des Freistaates Sachsen gemittelt, auf ein Jahr aggregiert und mit der ebenfalls gemittelten Jahresernte verschiedener Getreidearten sowie weiterer Nutzpflanzen in Beziehung gebracht. Ein direkter Zusammenhang zwischen den erzielten Jahreserträgen der untersuchten Getreidesorten und dem SPEI-3 ist nicht erkennbar, sondern tritt eher zufällig oder in Abhängigkeit von der Getreideart auf. Dies verdeutlicht auch die Gegenüberstellung der Jahreserträge mit den Jahresniederschlägen in Abbildung 20.

In einem zweiten Schritt wurden die Jahreserträge mit den meteorologischen Bedingungen der beiden Vegetationsperioden korreliert (Anlage 4). In VP I korreliert lediglich die Sommergerste signifikant positiv mit dem SPI3/6. In VP II gehen Kartoffel- sowie Zuckerrüben-erträge bei Trockenheit zurück (signifikant positive Korrelationen zu SPI/SPEI 1 und 3). Die Erträge von Silagemais, Winterweizen, Roggen, Hafer, Wintergerste, Körnermais und Raps zeigen keine Abhängigkeit von den untersuchten Trockenkennwerten.

Dass nicht mehr aussagekräftige Zusammenhänge aufgedeckt werden konnten, ist zum einen auf die zu kurze Datenreihe zurückzuführen und zum anderen auf die starke Reduktion der gegebenen Komplexität der Ertragsgenerierung auf meteorologischen Monatswerte. Es fehlen beispielsweise Informationen zum Auftreten spezifischer Wetterereignisse, insbesondere während sensibler Entwicklungsphasen der Feldfrüchte (z.B. extreme Hitze, Starkniederschlag, Hagel, Sturm), zu Schädlingsbefall und zum Düngeregime.

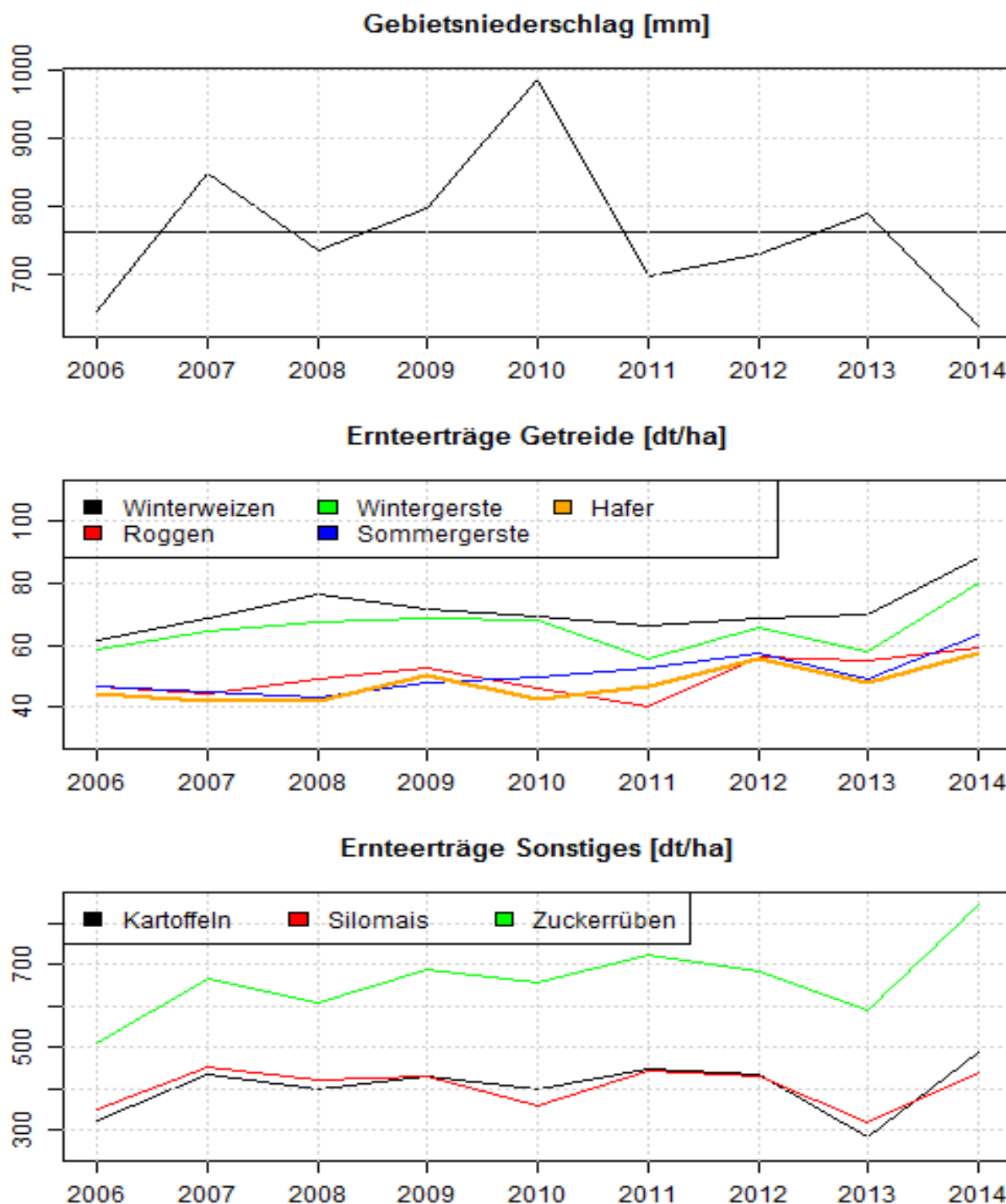


Abbildung 20: Gebietsniederschläge und landwirtschaftliche Erträge

5.2.2 Sektor Forstwirtschaft

Auch in der Forstwirtschaft gibt es bisher keinen Standard zur Messung der Dürreintensität (METTE et al. 2011). Generell basieren Studien zu Trockenheitsauswirkungen im forstwirtschaftlichen Sektor meist auf Baumringanalysen zum Dickenwachstum der Bäume. Dürrezustände sind unabhängig von vorherrschenden klimatischen Bedingungen im Sommer am relevantesten, da hier Vegetationsaktivität und Wasserbedarf am größten sind (PASHO et al. 2011; VICENTE-SERRANO et al. 2012, 2014). Die Variationen der Trockenheitsindizes im Winter werden für Trockenheitsbewertungen von Wäldern in Mitteleuropa als weniger bedeutend betrachtet, da die Bodenwasserspeicher im Regelfall noch vor Februar wieder aufgefüllt sind (METTE et al. 2011). Die relevanten Zeitskalen der Trockenheitsindizes hängen sowohl von den Standortbedingungen (Klima, Boden, etc.) als auch von der Baumart ab. Während Eichen recht tolerant gegenüber Trockenheit sind, reagieren Kiefern sehr sensitiv (PASHO et al. 2011).

VICENTE-SERRANO et al. (2012) beschrieben in einer globalen Studie größere Korrelationen des Dickenwachstums von Bäumen mit dem SPEI relativ zum SPI. Für die nördliche Hemisphäre betrachteten VICENTE-SERRANO et al. (2014) den Einfluss von Dürreereignissen unterschiedlicher Länge auf das räumliche und zeitliche Muster von Bäumen und zeigen, dass die Reaktion der Bäume auf Dürrebedingungen durch biogeographische, topographische und klimatische Eigenschaften des Standortes bestimmt werden. Wälder in semiariden Gebieten zeigten sich hierbei weniger durch häufig wiederkehrende, kurzfristige Trockenheit beeinflusst, als die unter humiden Bedingungen gewachsenen Bäume. Durch dauerhaft trockene Bedingungen unter semiariden Bedingungen haben dortige Bäume eine gewisse Toleranz gegenüber solch kurzfristigen Dürren entwickelt; sie reagieren erst auf schwere, langanhaltende Trockenphasen. Wie schon im Bereich der Landwirtschaft ist die Pufferkapazität des Bodens ein wichtiger Aspekt bei der Trockenheitsbewertung von Wäldern (METTE et al. 2011). Auch wenn ausgeprägte Trockenphasen den Einzelbaum oder den Bestand temporär schwächen können und für trockenheitsliebende Schädlinge wie den Borkenkäfer anfällig machen, waren sie bisher keine direkte Ursache für großflächiges Waldsterben in Deutschland (BAYRISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT 2004). Anders ist dies bei wiederkehrenden, langanhaltenden Trockenphasen wie in den Jahren 2018 und 2019, als deutschlandweit mehr als 100.000 Hektar Totalausfall zeigten.

METTE et al. (2011) diskutierten die Verwendbarkeit des PDSI und des SPI in der bayrischen Forstwirtschaft und schlussfolgern, dass beide Indizes nur als Anhaltspunkt für den Dürrestress von Wäldern dienen können. Dennoch stellen Dürre-Indizes ein einfaches und verständliches Maß zur Beurteilung von Dürren auf statistischer Grundlage dar. Als geeignete Trockenheitsindexzeitskalen für die Charakterisierung der im Mittel von Anfang Mai bis Ende September dauernden forstlichen Vegetationsperiode schlagen METTE et al. (2011) die Verwendung des Augustwertes für den SPI-3 und des Septemberwertes für den SPI 6 vor.

Forstliche Schäden durch Trockenheit weisen – bei stationsweiser Analyse – lediglich signifikante negative Korrelationen zu SMI_{Ober} ($R=0,32$) auf (nicht zu meteorologischen Indizes), demzufolge führt insbesondere ein trockener Oberboden zu Trockenschäden (Anlage 5). Etwas unsicherer ist die Datengrundlage bei der Betrachtung von Forstkulturen (Höhe i.d.R. bis 1,5 m) und alten Forstbeständen. Deshalb sind auch die Ergebnisse mit größeren Unsicherheiten behaftet. Trockenschäden an Forstkulturen korrelieren sehr signifikant mit SPI/SPEI1-6 und dem SMI von Ober- und Gesamtboden. Tendenziell sind also kurzfristige Wasserdefizite für die Schäden relevant. An alten Forstbeständen sind keine signifikanten Korrelationen zu Indizes vorhanden. Grundsätzlich reagiert der Jungwuchs empfindlicher auf trockene Bedingungen als der Altbestand, da ihm die entsprechenden Reserven (z.B. an gespeicherten Kohlenhydraten) zum Umgang mit Trockenheit fehlen, seine Wurzeln noch nicht so tiefe Wasserressourcen erschließen können und sich frisch gepflanzte Bäume/Pflanzen an dem jeweiligen Standort erst anwachsen und an diesen anpassen müssen.

Eine auf flächenhaften meteorologischen Daten beruhende, monatliche Analyse verdeutlicht, dass die größten Korrelationen in den Monaten September bis Dezember auf den Zeitskalen von drei bis 10 Monaten auftreten – grundsätzlich ist entsprechend das Feuchtigkeitsangebot während der vorhergehenden Vegetationsperiode entscheidend (Anlage 6).

Die Zeitreihen der Forstschäden sind in Abbildung 21 visualisiert. Die Jahre 1983, 1989/90, 2003, 2006 und 2018 wiesen unterdurchschnittliche Niederschläge auf und zogen Trockenschäden an forstlichen Beständen nach sich. Aber auch unter normalen bis feuchten Bedingungen, wie 2008 und 2016 traten Schäden auf. Hierbei ist anzumerken, dass einzelne Zeiträume in den angesprochenen Jahren zu warm und zu trocken und damit förderlich für Dürreschäden an den Pflanzen bzw. auch für eine entsprechende Entwicklung der Borkenkäfer waren. Für die Entwicklung zuletzt genannter sind darüber hinaus auch vorhergehende Sturmwürfe (wie zum Bsp. vor dem „Borkenkäferjahr 2008/09“

verursacht von den Stürmen „Kyrill“ und „Emma“) für eine hohe Schadmenge mit verantwortlich. Für das Jahr 2016 ist ein nennenswerter Anstieg nur bei den Altbeständen zu erkennen, was vermutlich eher als verzögerte Wirkung auf die extreme Spätsommerwitterung 2015 zurückzuführen ist. Die Kulturen hatten 2015 bereits zeitnah Dürreschäden gezeigt.

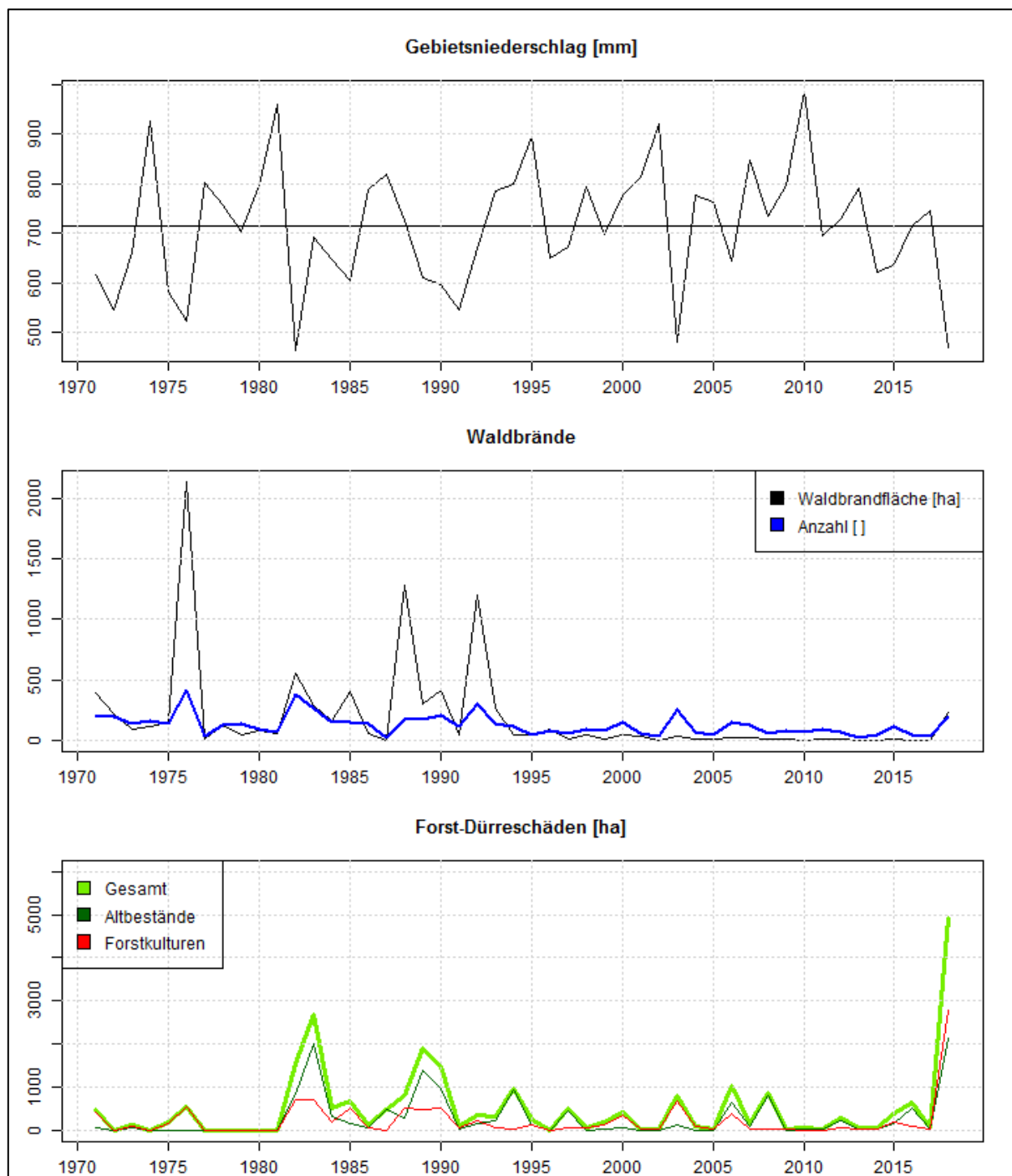


Abbildung 21: Gebietsniederschläge und Schäden durch Waldbrand und Dürre

Für die von Waldbrand betroffene Forstfläche (ohne Bundeswald) sowie die Anzahl von Waldbränden zeigen sich (sehr hohe) signifikante negative Korrelationen zu SPI 1–12 und dem SMI des Ober- und Gesamtbodens, wobei die stärksten Korrelationen zu SMI_{Ober} und SPI₆ bestehen (Anlage 5). Kurz- bis mittelfristige Trockenheiten führen demzufolge zu häufigen Waldbränden mit großen betroffenen Arealen. Wie der Abbildung 21 zu entnehmen ist, traten die meisten Waldbrände mit den größten betroffenen Flächen vor 1993 auf. Danach ist ein starker Rückgang von Waldbränden zu verzeichnen, was auf ein verbessertes Management (Vorsorge, Aufklärung) und eine erhöhte Melderate (starke Verbreitung von Mobiltelefonen) zurückzuführen ist. Der Zusammenhang zwischen sehr trockenen Bedingungen (geringer Niederschlag) und der Gefahr von Waldbränden ist visuell zu erkennen. Detailanalysen zeigen

(Anlage 5), dass das Auftreten von Waldbränden und deren Fläche vor allem in der zweiten Jahreshälfte (Sommer, Herbst) mit trockenen Bedingungen korreliert ist. Die größten Korrelationen treten hier für die Zeitskalen von 3 bis 18 Monate in den Monaten Juli bis Dezember auf, wobei eine Verschiebung der hochkorrelierten Wirkungszeitskalen im Jahresverlauf sichtbar ist. Das Ergebnis verwundert etwas, da entsprechend der Beobachtungen die meisten Waldbrände im Frühjahr und Sommer auftreten.

Weiterhin wurden die Korrelationen zwischen Dürreindikatoren und den von verschiedenen Forstschädlingen befallenen Holzmengen (Festmeter) berechnet (Anlage 7: Korrelationsmatrix zwischen Dürreindizes und von Forstschädlingen befallenen Holzbeständen (Festmeter)) und die Zeitreihen visualisiert (Abbildung 22). Bei den Fichtenschädlingen sind (sehr) signifikante negative Korrelationen von Kupferstecherschäden zu SPI/ SPEI1–6 und SMI_{ober} und eine signifikante negative Korrelation von Buchdruckerschäden zum SPEI6 zu verzeichnen. Die Korrelationskoeffizienten sind mit maximal 0,39 gering. Grundsätzlich ist bei der Betrachtung des Schädlingsbefalls bezogen auf Witterungsparameter nicht nur die Wasserbilanz als Einflussgröße für die Baumvitalität entscheidend. Es sind zum Beispiel auch der Temperaturverlauf, die Temperatursumme in der Entwicklungszeit und die Sonnenscheindauer relevant. So erfolgt eine Entwicklung der Larven unter der Rinde bereits bei (Rinden-)Temperaturen über 8°C. Der Schwärmflug von Borkenkäfern tritt vor allem an sonnigen Tagen mit Temperaturen über 16,5 °C und unter 30°C auf. Dabei besiedeln die Borkenkäfer vorzugsweise geschwächte oder bereits abgestorbene Bäume (z.B. Sturmholzschäden in 2018). Dies führt wiederum häufig zu einem Populationsdichteanstieg der Käfer. Bei einem Massenangriff sind auch gesunde Bäume betroffen. Deshalb ist es schwierig, direkte Zusammenhänge zum Auftreten trockener Bedingungen herzustellen. Durch das Unterschreiten bestimmter Tageslichtlängen wird das Ende der Schwärmsaison beeinflusst. Durch die im Rahmen des Klimawandels ansteigenden Temperaturen und die somit verlängerte Vegetationsperiode können auch die Borkenkäfer potentiell mehr Generationen ausbilden und somit größeres Schadpotential entfalten. Kupferstecher und Buchdrucker vermehren sich demzufolge verstärkt in von Trockenstress befallenen Beständen, wie in den Jahren 2003 und 2018

Für Eichenfraßgesellschaften resultieren (teilweise signifikante) positive Korrelationen zwischen den Schäden, dem SMI und den Trockenkennwerten. Diese Insekten bevorzugen eher feuchte Bedingungen. Die Gegenüberstellung von Gebietsniederschlägen und befallenen Holzbeständen in Abbildung 22 zeigt, dass die hohen Schäden durch Eichenfraßgesellschaften 1980, 1987, 1993–1996 nicht mit trockenen Bedingungen zusammenfallen. Eine monatsweise Korrelationsanalyse (Anlage 8:) verdeutlicht für den Goldafer einen längerfristigen Zusammenhang. Signifikante negative Korrelationen sind für Bezugszeiträume ab 18 Monaten zu erkennen. Trockenperioden, die mehr als ein Jahr zurückliegen und die Bestände geschwächt haben, könnten die Ursache für einen starken Befall mit Goldafer sein. In Abbildung 25 erfolgte der bisher stärkste Befall im Jahr 1977 – ein Jahr nach einem sehr trockenen Jahr. Ein ähnlicher zeitlicher Versatz ist für den Eichenwickler und Eichenmehltau nur ansatzweise erkennbar (leichte, nicht signifikante negative Korrelationen), für den Frostspanner nicht.

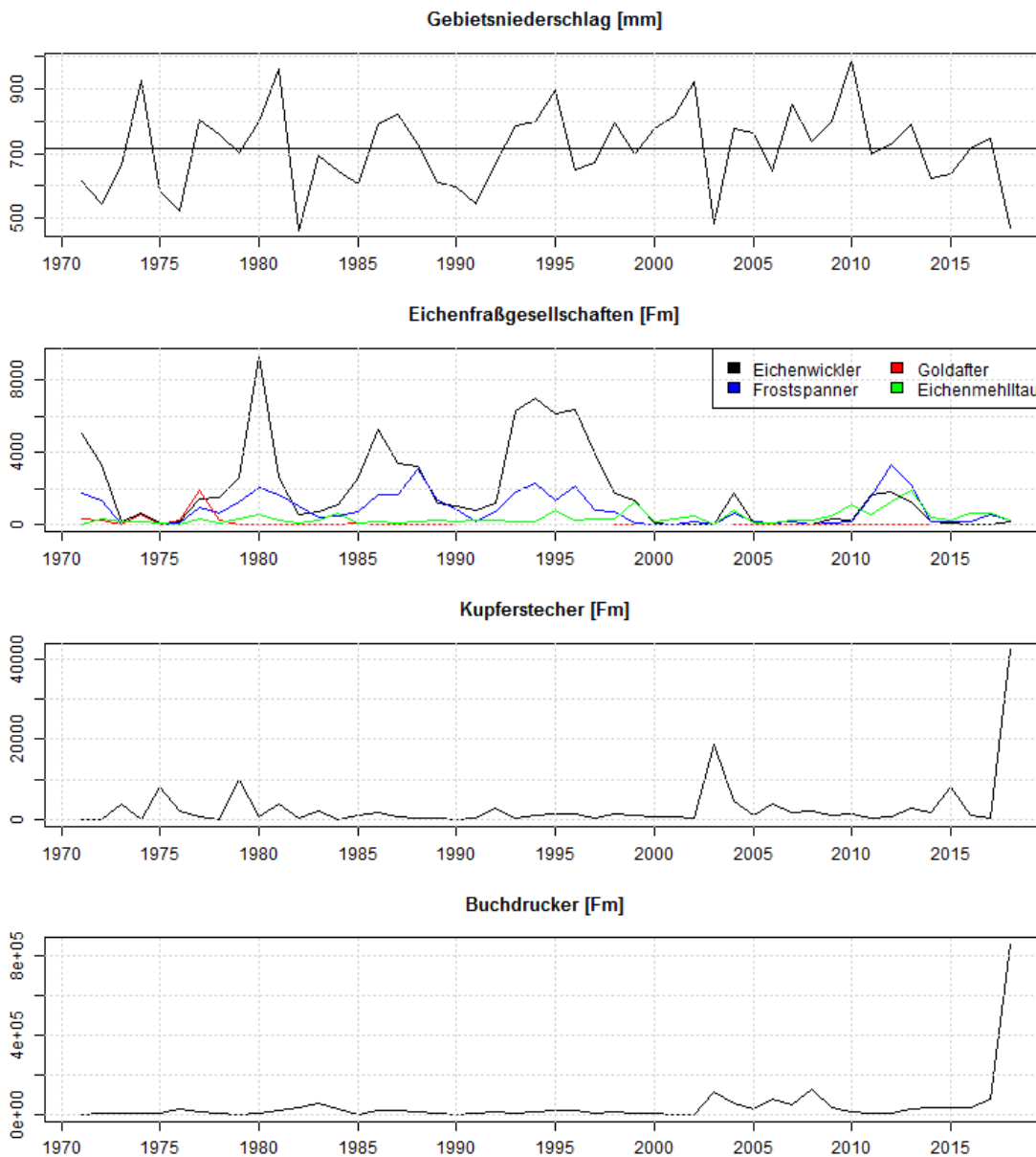


Abbildung 22: Niederschläge und von Schädlingen befallene Forstbestände in Sachsen

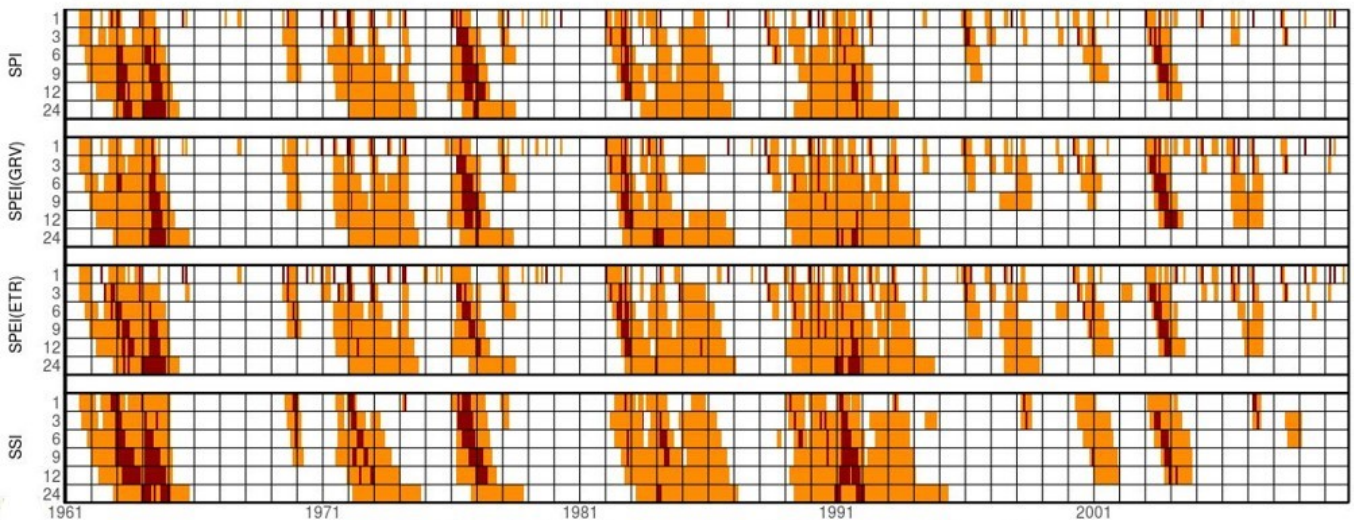
5.2.3 Sektor Wasserwirtschaft

In Bezug auf den Wassersektor sind unterschiedliche Zeitskalen relevant, da zum einen Trockenheit häufig nur in Teilbereichen des hydrologischen Kreislaufes auftritt und die hydrologischen Systeme in verschiedenen Regionen aufgrund von Unterschieden in Lithologie, Topographie und Wassermanagements sehr divers auf Trockenheit reagieren (VICENTE-SERRANO et al. 2011). Zudem können sich Indikator-Wirkungsbeziehungen mit der Zeit verändern und zudem eine große saisonale Variabilität aufweisen (LORENZO-LACRUZ et al. 2010)

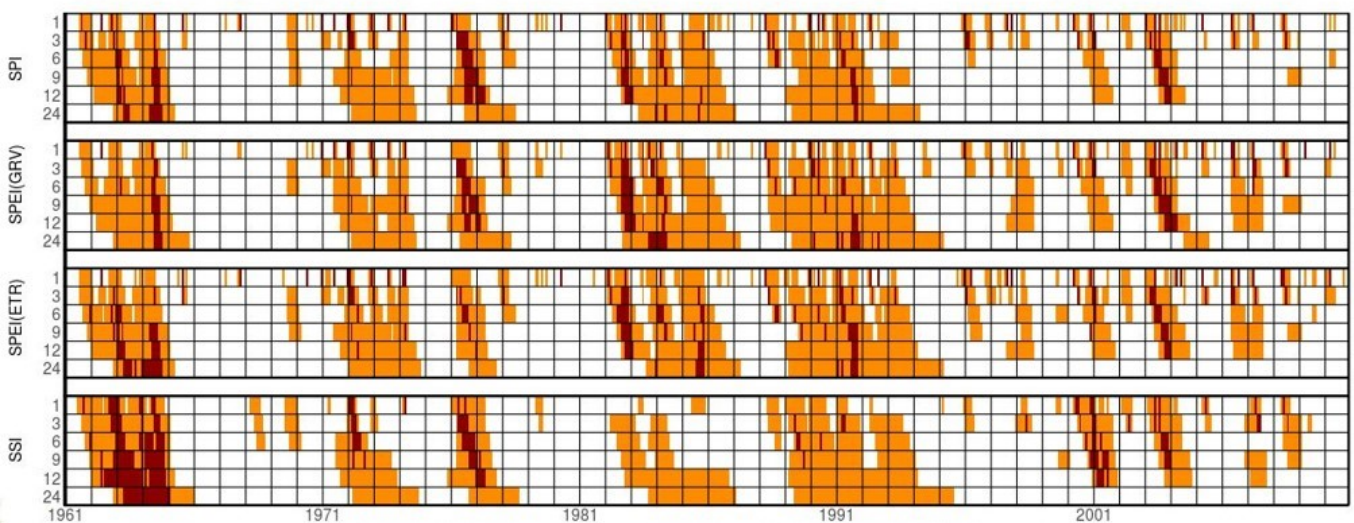
Für das Einzugsgebiet (EZG) der Mulde wurde der Standardisierte Abflussindex SSI beispielhaft für drei Pegel, die für unterschiedliche EZG-Größen stehen (groß: Bad Dübén, mittel: Chemnitz, klein: Wolfsgrund), berechnet. Für die Vergleiche mit den Trockenheitsindizes wurden die meteorologischen Eingangsdaten über das jeweilige EZG gemittelt und dann die Indexwerte berechnet. Basierend auf diesen Gebietsindexreihen wurde die Dauer trockener Phasen bestimmt und auf sechs unterschiedlich langen Wirkungszeitskalen in der Abbildung 23 dargestellt. Vergleichend wird der SPEI unter Einbeziehung der realen (ETR) anstelle der potentiellen Verdunstung berechnet. Die reale Verdunstung stammt dabei aus der Modellierung mit ArcEGMO, die in der Säule B des Wasserhaushaltsportals Sachsen (http://whhportal-sachsen.hydro.tu-dresden.de/saeuleB/index_b.html) für alle Einzugsgebiete in Sachsen zur Verfügung

gestellt wird. In allen drei EZG und für alle vier verglichenen Indizes werden im Wesentlichen die gleichen Trockenphasen bestimmt und es ist jeweils eine Verschiebung in Richtung längerer Trockenperioden mit zunehmender Wirkungszeitskala zu beobachten. Die Verwendung von ETR anstelle von ETP in der SPEI-Berechnung hat zumeist recht geringe Auswirkungen auf die statistischen Kenngrößen von Trockenperioden. Mittels des SSI werden zumeist weniger – dafür jedoch länger andauernde Trockenperioden ermittelt. Hier kommt der stärker integrierende Charakter durch die Einzugsgebiete und ihre Pufferkapazität gegenüber den aktuellen Wetterbedingungen zum Tragen. Auf den längeren Zeitskalen (ab ca. 12 Monate) werden die Unterschiede in der Häufigkeit und Andauer von Trockenperioden zwischen dem SSI und den klimatologischen Trockenheitsindizes SPI und SPEI geringer.

Vergleich der Andauer Trockenperioden im Einzugsgebiet Vereinigte Mulde



Vergleich der Andauer Trockenperioden im Einzugsgebiet Chemnitz 1



Vergleich der Andauer Trockenperioden im Einzugsgebiet Wolfgrund

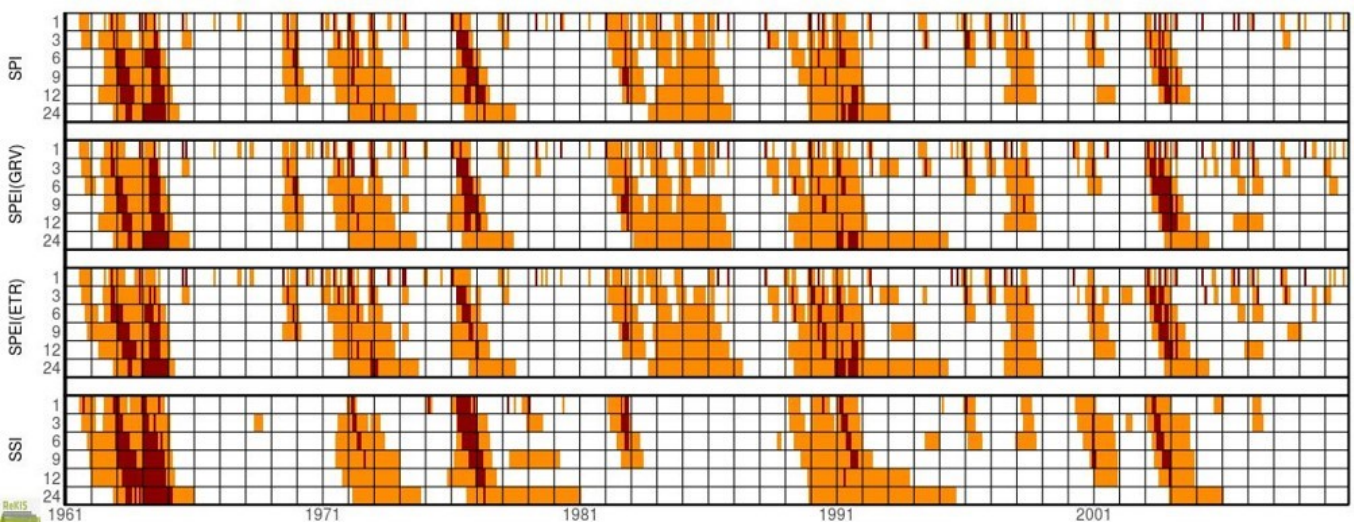


Abbildung 23: Vergleich des zeitlichen Auftretens von Trockenperioden (gemittelt über ausgewählte EZG) basierend auf dem SPI, zwei SPEI-Formen (SPEIGRV: berechnet mittels Grasreferenzverdunstung; SPEIreal: berechnet mittels der modellierten realen Verdunstung) und dem SSI (standardisierter Abflussindex) für sechs verschiedene Zeitskalen (1, 3, 6, 9, 12 und 24 Monate); Zeitraum: 1961-2010. Moderate Trockenperioden (SPEI < 0 und mind. einmal im Verlauf der Trockenperioden < -1) sind orange und starke Trockenphasen (SPEI dauerhaft < -1,5) sind rot gekennzeichnet.

Um die Zusammenhänge zwischen den gemessenen Abflusswerten (mittels SSI) und den Trockenheitsindizes SPI und SPEI zu quantifizieren, wurden deren Zeitreihen auf verschiedenen Zeitskalen korreliert. Tests mit dem parametrischen Pearson-Produktmoment-Korrelationskoeffizienten und dem nichtparametrischen Spearman-Korrelationskoeffizienten zeigen nur geringe Abweichungen in der Größe der Korrelationen. Nachfolgend sind daher nur die Ergebnisse für den robusteren Spearman-Korrelationskoeffizienten dargestellt. Abbildung 24 zeigt exemplarisch die Zusammenhänge für drei Pegel der Vereinigten Mulde. Es wird deutlich, dass die Einzugsgebiete mit ihren Abflüssen über Zeiträume von drei bis sechs Monaten sehr stark von den Klimabedingungen (Niederschlag und Verdunstung) abhängen, auch wenn kurzfristig Schwankungen auftreten (z.B. durch Bewirtschaftungseinflüsse wie Staustufen, Absenkungen durch Bergbau, Flutung von Tagebaurestseen). Mit zunehmenden Wirkungszeitskalen führen auch zeitliche Verschiebungen zu hohen Korrelationen. So korreliert beispielsweise der SSI1 des Monats August stark mit dem SPEI12 des Augusts, aber auch mit dem SPEI12 des Monats Mai. Des Weiteren fällt auf, dass die Korrelationen für größere EZG etwas höher sind. An der Anlage 9: sind die sehr ähnlichen Ergebnisse für die Elbe und zwei Zuflusseinzugsgebiete dargestellt.

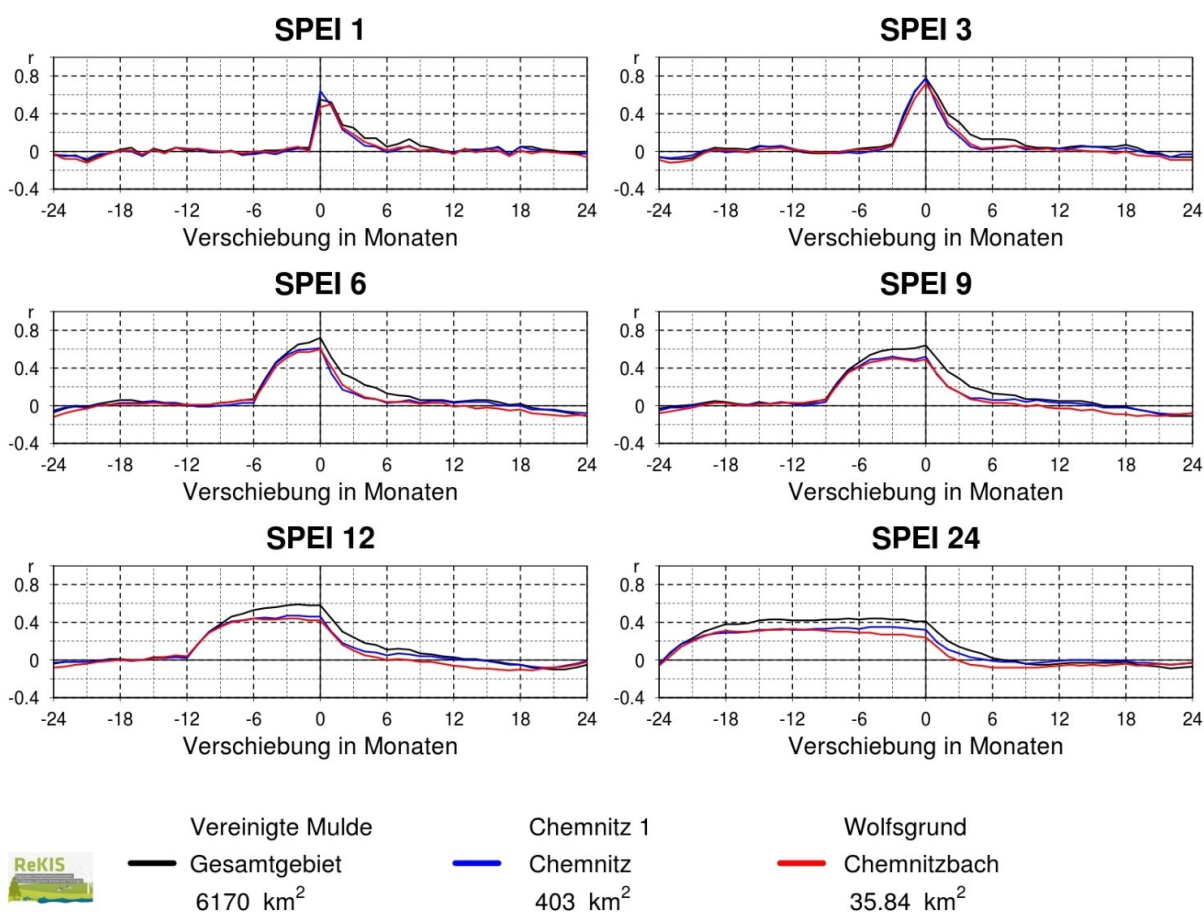
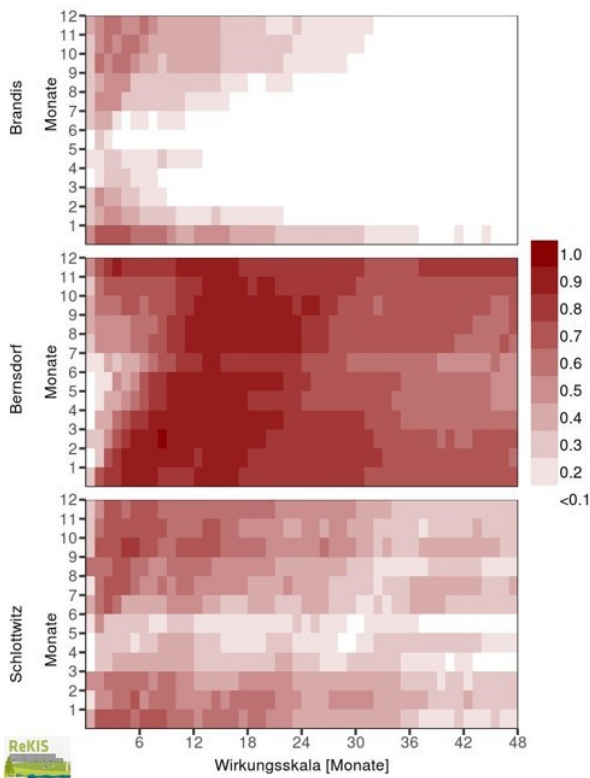


Abbildung 24: Korrelation des SSI 1 mit dem SPEI auf sechs verschiedenen Zeitskalen und für Verschiebungen zwischen den beiden Zeitreihen zwischen -24 bis +24 Monaten dargestellt für drei unterschiedlich große EZG im Mulde-Einzugsgebiet; Zeitraum: 1961–2010.

Für ausgewählte Grundwassermessstellen erfolgten Korrelationsanalysen des standardisierten Grundwasserindex SGI mit dem SPEI (Abbildung 25) auf Zeitskalen von 1 bis 48 Monaten. Dazu wurde jeweils der meteorologische Kennwert der Rasterzelle, in der die Grundwassermessstelle liegt, mit dem SGI korreliert. Man erkennt deutliche Unterschiede in der Größe der Korrelationen zwischen den sechs untersuchten Pegeln. An Grundwassermessstellen wie Brandis und Schlottwitz sind andere Einflussgrößen, wie z.B. geologische Bedingungen, relevanter als die klimatischen. Insgesamt werden die größten Korrelationen meist bei längeren Wirkungszeitskalen erreicht, was das „längere Gedächtnis“ des Grundwassers im Vergleich zum Oberflächenwasser widerspiegelt. Die Korrelationen bleiben oft bis etwa 18–24 Monate auf einem hohen Niveau. Beim Pegel Dittelsdorf sind die Korrelationen sogar nach 48 Monaten noch auf sehr hohem Niveau. Grundsätzlich ist die Höhe der Korrelationen kaum vom verwendeten Trockenheitsindex (SPI vs. SPEI) abhängig.

Monatliche Korrelationskoeffizienten
zwischen den SGI-1 und dem SPEI
auf den Wirkungszeitskalen von 1 bis 48



Monatliche Korrelationskoeffizienten
zwischen den SGI-1 und dem SPEI
auf den Wirkungszeitskalen von 1 bis 48

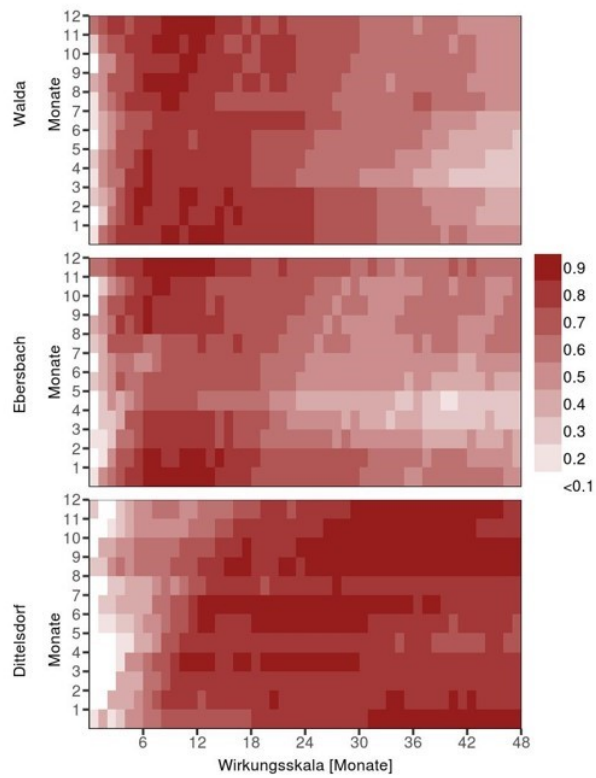


Abbildung 25: Korrelation (Spearman-Rangkorrelationskoeffizient) zwischen dem standardisierten Grundwasserindex (SGI) auf der Zeitskala von einem Monat mit dem SPEI auf verschiedenen Wirkungszeitskalen (1 bis 48 Monate) und für verschiedene zeitliche Verzögerungen (lag) zwischen den Datenreihen; Zeitraum: 1961–2014.

5.3 Index der Bodentrockenheit

Der SMI schwankt zwischen Null und Eins, wobei Werte $< 0,3$ als erste Dürreklasse („Vorwarnstufe“) klassifiziert werden. Exemplarische wird eine SMI-Zeitreihe des Gesamtbodens für eine Gitterzelle in Abbildung 26 dargestellt.

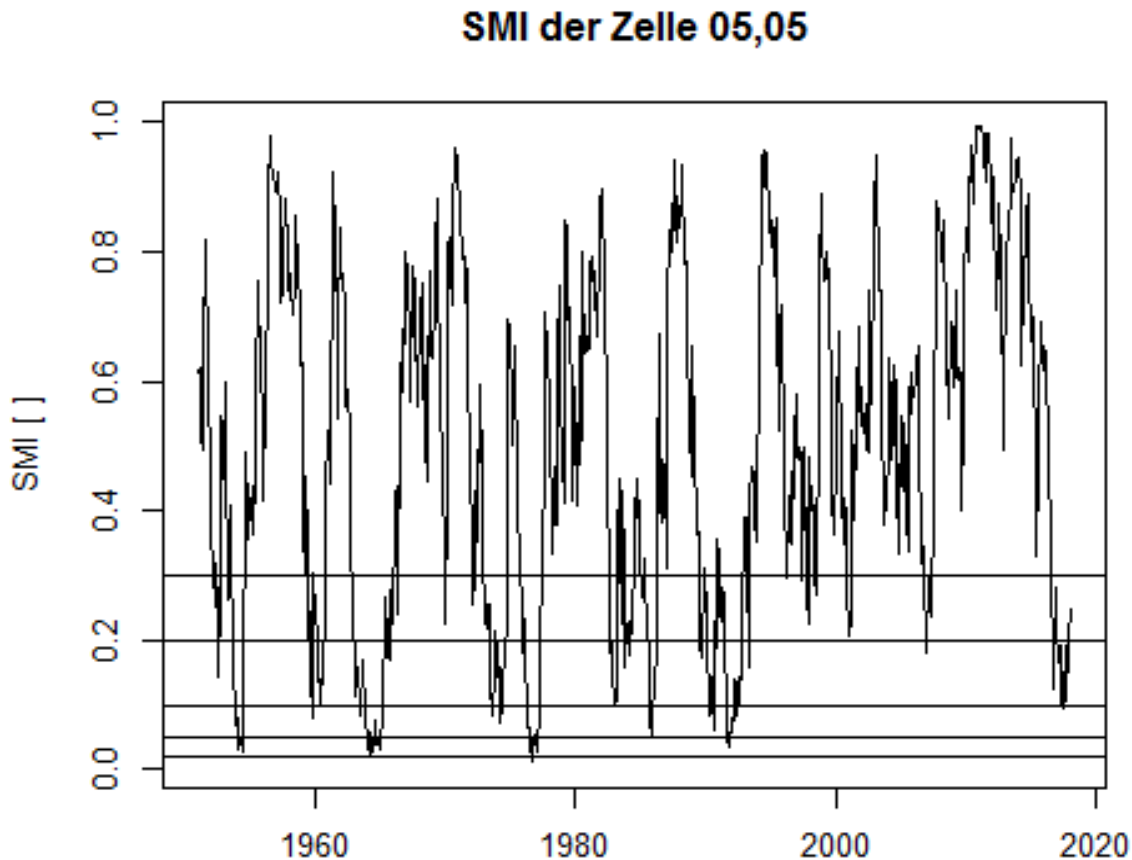


Abbildung 26: Exemplarische Darstellung der SMI über Gesamtperiode für eine Rasterzelle.

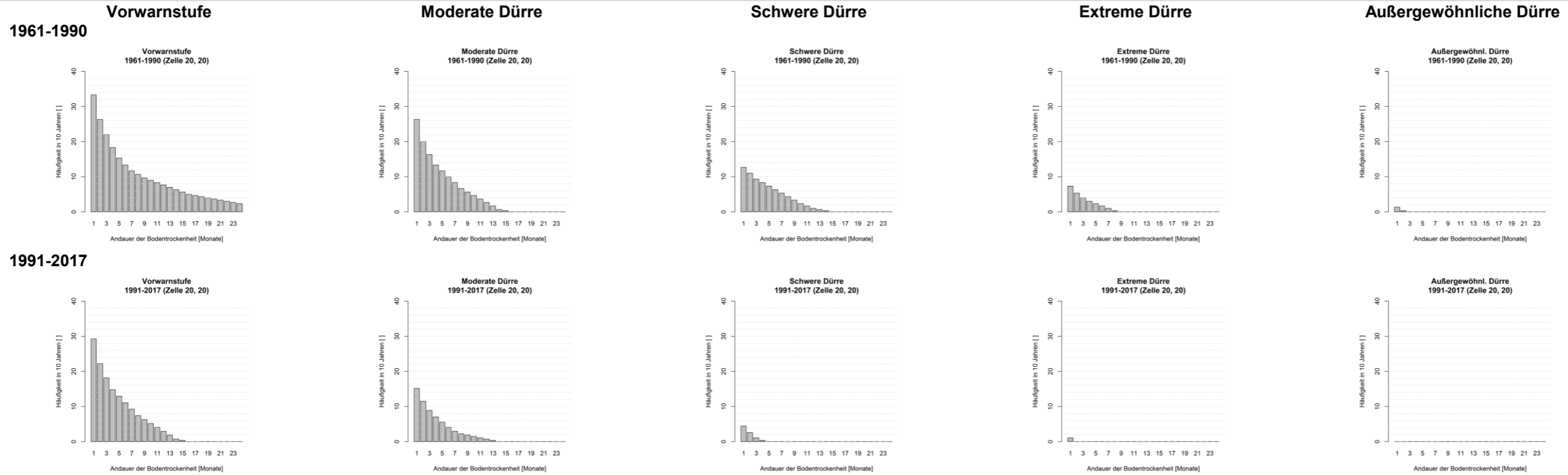
Die Häufigkeit von Bodentrockenheit verschiedener Andauern der fünf SMI-Klassen ist in Abbildung 27 für die Gitterzelle 20, 20 und in Anlage 10 und Anlage 11 für die Gitterzelle 25, 25 dargestellt. Es manifestieren, sich zeitliche Veränderungen; beispielsweise tritt die Bodentrockenheit ‚Vorwarnstufe‘ mit einer Andauer von einem Monat in der Referenzperiode RP ca. 30 Mal in 10 Jahren im Gesamtboden auf. Bodentrockenheit längerer Andauern kommen weniger häufig vor, z. B. nur zwei Perioden mit 24 Monaten Andauer. In der aktuellen Periode AP häufen sich Bodentrockenheiten der ‚Vorwarnstufe‘ über alle Andauerstufen in einigen Regionen, in anderen nehmen sie leicht ab. Die stärkeren Bodentrockenheiten nehmen über alle Andauerstufen ab.

Die Veränderungen im Oberboden sind denen im Gesamtboden sehr ähnlich. Lediglich ist keine Zunahme von Dürren der ‚Vorwarnstufe‘ erkennbar.

Der Oberboden reagiert wesentlich schneller auf Änderungen im Niederschlags- und Verdunstungsregime als der Gesamtboden. So können sich bei einem Niederschlagsdefizit schnell kurze Trockenheiten im Oberboden ausbilden. Erneuter Niederschlag führt zu einer raschen Milderung der Trockenheit. Der Gesamtboden reagiert wesentlich träger; so gelangen geringe Niederschläge nicht in tiefere Bodenschichten und die Trockenheit bleibt nahezu für den Gesamtboden unverändert.

Inwieweit sich die für die zwei exemplarischen Gitterzellen visualisierten Häufigkeiten von Bodentrockenperioden auch in der Fläche Sachsens widerspiegeln, verdeutlichen die nachfolgenden Analysen. Im Abschnitt 5.3.1 wird jahreszeiten-spezifisch die Auftretenshäufigkeit der fünf SMI-Dürreklassen analysiert. (Auswertung einmonatiger Dürreereignisse). Länger anhaltende Bodentrockenheiten von bis zu 24 Monaten werden für das Gesamtjahr in Abschnitt 5.3.2 präsentiert.

Gesamtboden



Oberboden

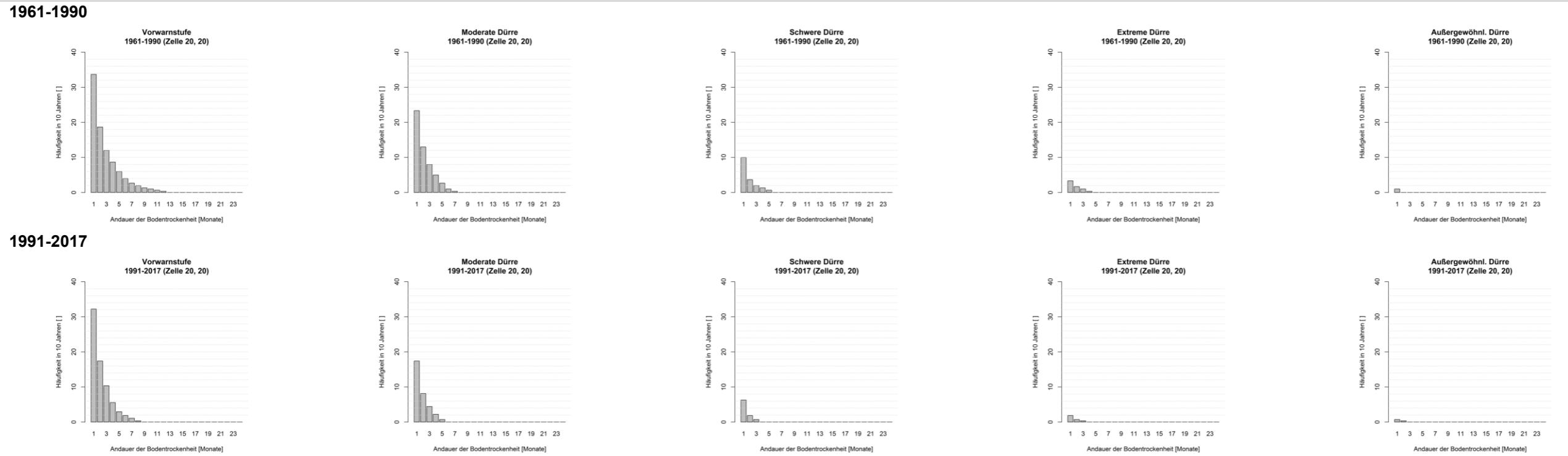


Abbildung 27: Andauer von Bodentrockenheit verschiedener Andauern (1–24 Monate) für fünf Bodenfeuchteindex-Klassen und zwei Vergleichszeiträume.

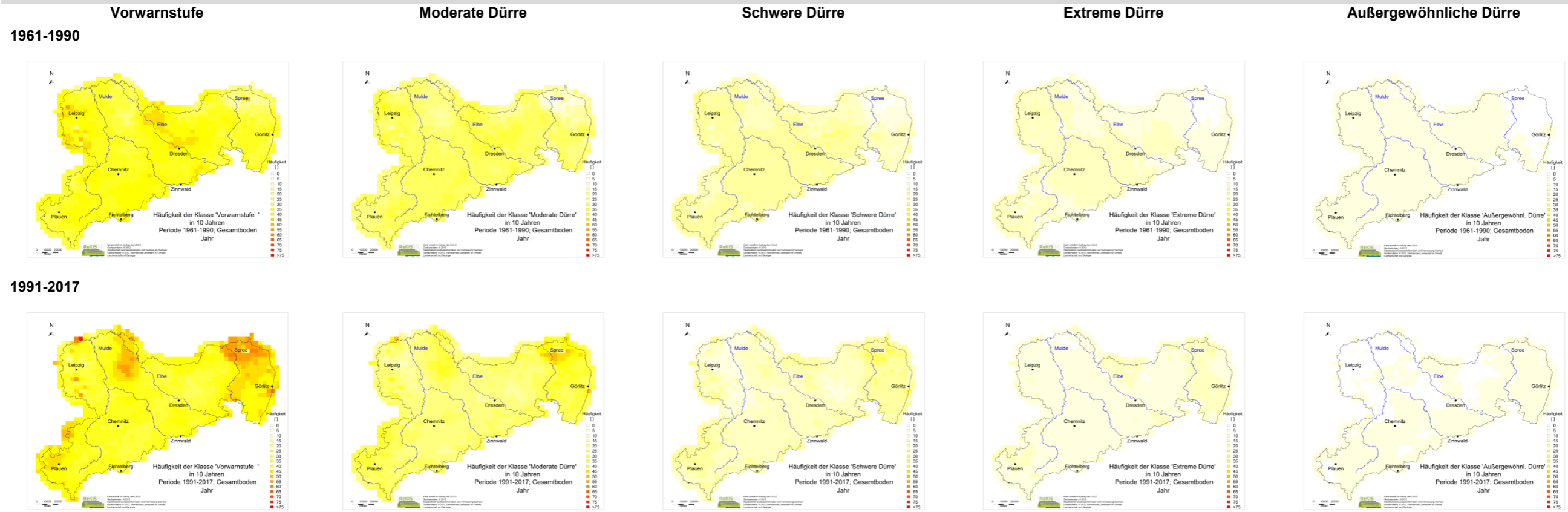
5.3.1 Häufigkeit der fünf Bodenfeuchteklassen

Eine Analyse regionaler Unterschiede von einmonatigen Bodentrockenheiten verschiedener Dürreklassen ermöglicht die **Abbildung 28**. Beispielsweise traten im Gesamtboden 35–40 Monate mit einer Bodentrockenheiten der Klasse ‚Vorwarnstufe‘ in 10 Jahren in der Referenzperiode (RP, 1961–1990) nahezu flächendeckend in Sachsen auf. Bis zu fünf Ereignisse mehr traten im mittleren Elbschlauch (und etwas nördlich davon) sowie in der Leipziger Region auf. In der aktuellen Periode (AP, 1991–2017) fallen die Regionen im Nordosten, Norden und Südwesten mit erhöhten Häufigkeiten (bis zu 55 Ereignisse) auf. Dagegen hat sich Häufigkeit im mittleren Elbschlauch etwas verringert. Solche regionalen Änderungen in der Häufigkeit fallen auch in den weiteren vier Dürreklassen im Gesamtboden auf, jedoch weniger ausgeprägt. Die Farben der höheren Dürreklassen sind schwächer, was auf die verminderte Häufigkeit von stärkeren Bodendürren hinweist. Eine Region, die über alle Dürreklassen hinweg durch erhöhte Häufigkeiten in der AP auffällt, ist der Nordosten Sachsens. Im Oberboden sind kaum räumliche Differenzierungen und kaum Änderungen zwischen den beiden Perioden zu sehen. Im mehrjährigen Mittel gab es demzufolge kaum Änderungen in der Auftretenshäufigkeit von Bodendürren.

Zeitliche Veränderungen auf Dekadenebene verdeutlicht **Abbildung 29** für die „Vorwarnstufe“. Die regionalen Dürrebetreffenheiten variieren stark über die Zeit. So häuften sich in 2001–2010 im Osten Sachsens die Bodentrockenheiten im Gesamtboden und in 2011–2017 eher der Westen. Auffällig ist die Zunahme räumlicher Gradienten in den letzten Dekaden, z.B. sind die Unterschiede zwischen Ost und Zentralsachsen in 2001–2010 deutlich höher als vor 1990. Die Klasse „Schwere Dürren“ kam in den letzten Dekaden ebenfalls verstärkt im Osten vor (siehe digitalen Anhang). Im Oberboden sind die regionalen Unterschiede und die zeitlichen Schwankungen deutlich geringer. Hier fällt lediglich die Dekade 1981–1990 mit größeren Häufigkeiten im Großteil Sachsens auf.

Eine jahreszeitliche Analyse der Häufigkeit von Dürren der ‚Vorwarnstufe‘ ist der **Abbildung 30** zu entnehmen. Große Teile Sachsens sind in der RP deutlich stärker im Herbst und Winter von Bodentrockenheiten im Gesamtboden betroffen als im Frühjahr und Sommer. In den VP I und II ergibt sich kein anderes Bild. Über alle Jahreszeiten hinweg sind das Leipziger Umland und der Elbschlauch in allen Jahreszeiten betroffen. In der AP nehmen die Häufigkeiten markant in vielen Regionen im Frühling und Sommer zu. Im Herbst und Winter sind das Erzgebirge und dessen Vorland weniger betroffen. Dafür bilden sich neue Dürre-Hotspots im Osten/Nordosten und im Norden (Düben/ Dahleener Heide). Insbesondere im ersten Teil der Vegetationszeit (VP I) sind die Zunahmen von Bodendürren sehr prägnant in vielen Regionen Sachsens. Später in der Vegetationszeit sind die starken Änderungen lokal etwas eingegrenzter. Neben den oben genannten Dürre-Hotspots ist auch das Vogtland verstärkt betroffen. Nahezu flächendeckend ist der Oberboden im Sommer, Herbst und Winter in der RP stark von Bodentrockenheit der ‚Vorwarnstufe‘ betroffen (**Abbildung 31**). Sehr ausgeprägt ist der Unterschied zwischen den Vegetationsperioden. Während in VP I flächendeckend nur wenige Trockenheiten auftraten, waren es in VP2 flächendeckend deutlich mehr, wobei der Osten Sachsens etwas stärker betroffen ist. Die aktuellen Entwicklungen zeigen eine starke Zunahme von Bodendürren im Frühling, und hier insbesondere in der VP I, und Abnahmen in den übrigen Jahreszeiten. Dies ist zurückzuführen auf die stattgefundenen Umverteilungen des Niederschlags und somit eine Bestätigung der rein meteorologischen Analysen (BERNHOFER et al. 2015a).

Gesamtboden



Oberboden

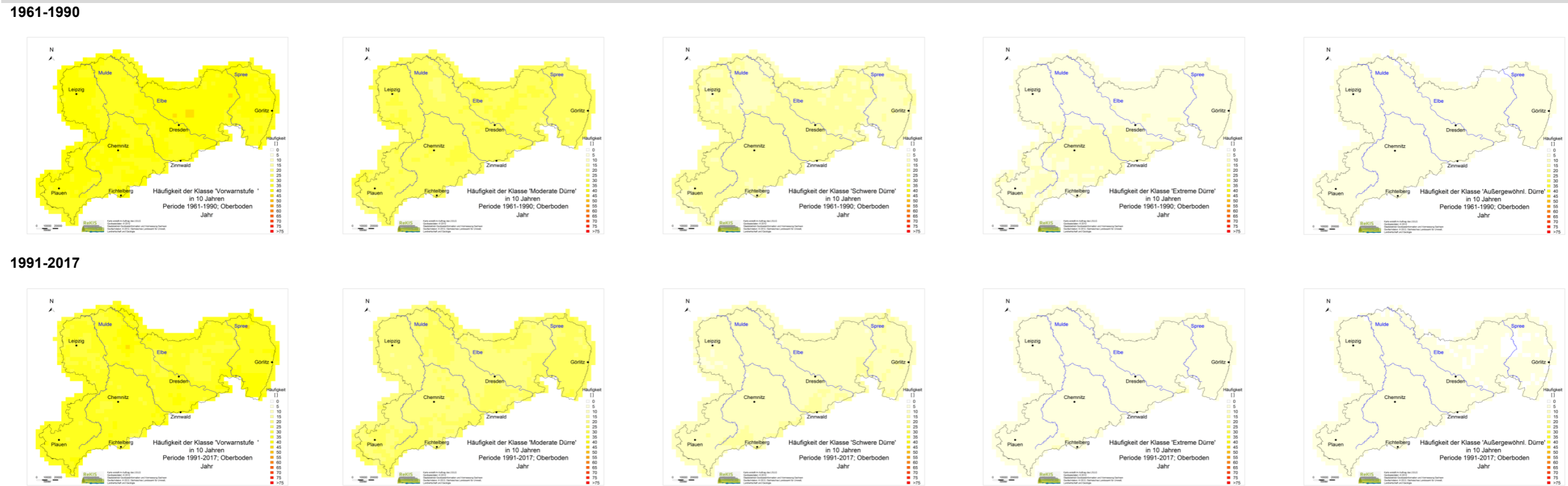


Abbildung 28: Mittlere Häufigkeit der fünf SMI-Dürreklassen in 10 Jahren; Vergleich 1961–1990 mit 1991–2017

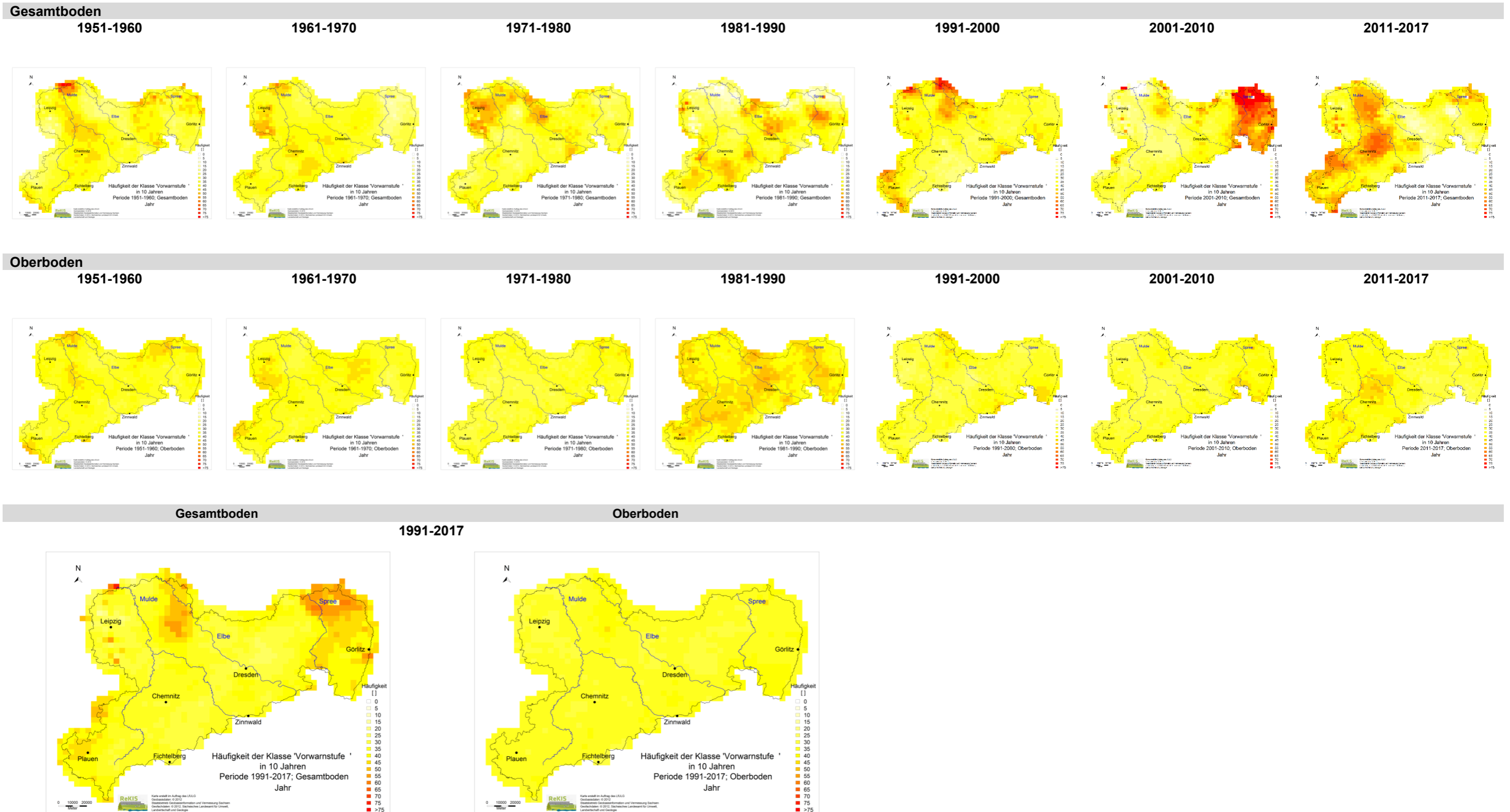


Abbildung 29: Häufigkeit der SMI-Klasse „Vorwarnstufe“ in den Dekaden von 1951–2017

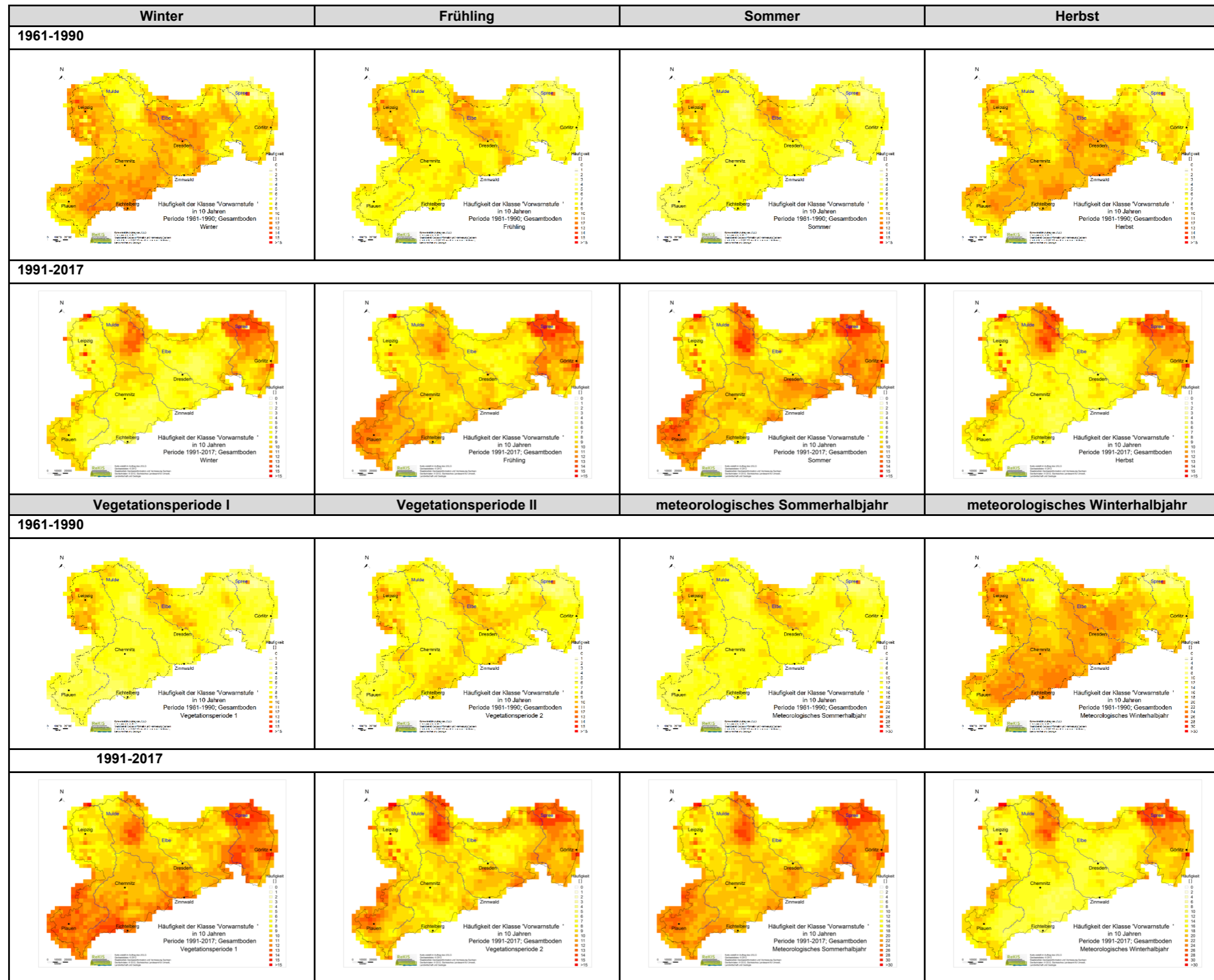


Abbildung 30: Häufigkeit der SMI-Klasse „Vorwarnstufe“ im Gesamtboden in den Jahreszeiten der Perioden 1961–1990 und 1991–2017

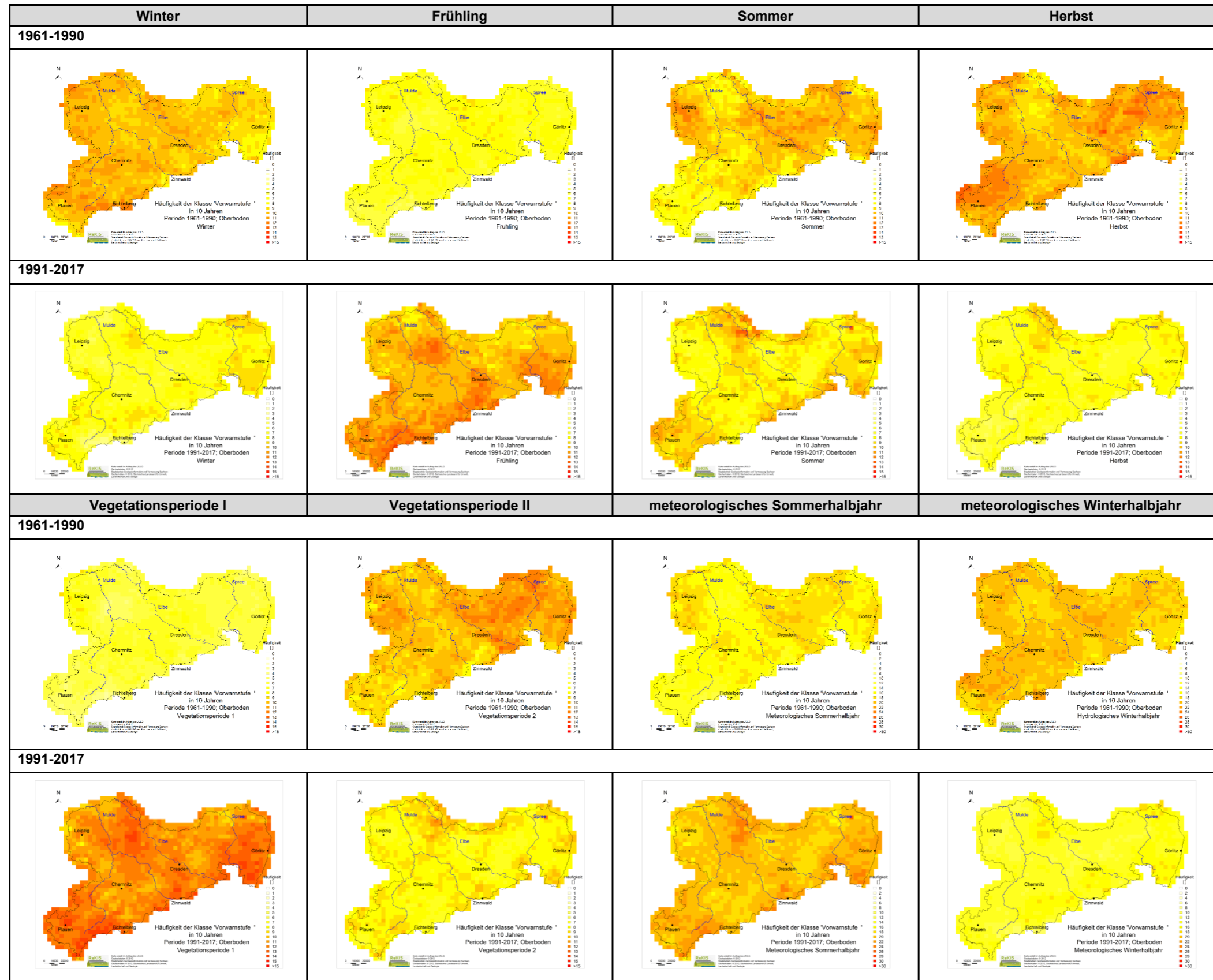


Abbildung 31: Häufigkeit der SMI-Klasse „Vorwarnstufe“ im Oberboden in den Jahreszeiten der Perioden 1961–1990 und 1991–2017

5.3.2 Häufigkeit von Bodendürren längerer Andauer

Wurde im vorherigen Abschnitt die Auftretenshäufigkeit von einmonatigen Bodendürren analysiert, geht es nun um die Analyse der Häufigkeit von länger anhaltenden Perioden (3, 6, 12, 24 Monate) mit Bodendürre. Für die Zeiträume 1961–1990 (RP) und 1991–2017 (AP) wurde eine Darstellung der absoluten Häufigkeit gewählt. Für alle weiteren Perioden werden die Abweichungen (Anomalien) zur RP dargestellt.

In **Abbildung 32** ist exemplarisch die Häufigkeit 3-monatiger Ereignisse der fünf Dürreklassen im Gesamtboden dargestellt. In der RP sind die Regionen um Leipzig und die Elbe am häufigsten von 3-monatigen Bodendürren der ‚Vorwarnstufe‘ betroffen. Die schwereren Dürreklassen kommen naturgemäß zunehmend seltener vor, wobei auffällt, dass Ostsachsen jeweils am wenigsten betroffen ist.

Die Häufigkeiten in der AP zeigen eine regionale Umverteilung von 3-monatigen leichten und mittleren Dürren mit einem neuen regionalen Dürreschwerpunkt im Osten bzw. Nordosten. ‚Extreme‘ und ‚Außergewöhnliche Dürren‘ sind in der rezenten Periode rückläufig.

Im Oberboden gibt es keine ausgeprägten regionalen Unterschiede in der Häufigkeit 3-monatiger Bodendürreereignisse in der RP (entsprechende Abbildungen im digitalen Anhang). Die aktuellen Entwicklungen zeigen eine leichte Abnahme dieser Bodendürren.

Für die weiterhin untersuchten Dürreandauern von 4 bis 24 Monate sind die Resultate sehr ähnlich (entsprechende Abbildungen im digitalen Anhang). Als Dürre-Hotspots sind auch hier deutlich der Osten/Nordosten, das Vogtland und die Region Düben-Dahlener Heide/ Nordsächsisches Platten und Hügelland zu erkennen.

In den in Abbildung 33 dargestellten dekadenweisen Anomalien von 3-monatigen ‚Extreme Dürre‘-Perioden sticht die Dekade 1961–1970 heraus. Im Sektor West/ Nordwest/ Nord traten großflächig vermehrte Bodentrockenheiten auf. In 1991–2000 traten ebenfalls gehäuft Dürreperioden im Norden/ Nordosten/ Osten und im Vogtland auf. Sonst kommt es großflächig zu Abnahmen der Häufigkeit oder es bleibt unverändert. Ein Vergleich zur Abbildung 34, in der 12-monatige „Moderate Dürre“-Perioden in den Dekaden aufgezeigt werden, weist prinzipiell ähnliche regionale Muster auf. Jedoch variieren die regionalen Ausdehnungen und der Umfang der Anomalien etwas. Für weitere spezifische Vergleiche können die Abbildungen aus dem digitalen Anhang genutzt werden.

Langanhaltenden Dürren kommen naturgemäß gehäuft in den gemäßigten Dürreklassen vor. So sind deutlich Änderungen der 12-monatigen „Moderaten Dürren“ über die Gesamtzeit erkennbar. Der Nordosten Sachsens ist in den rezenten Dekaden zunehmend von langanhaltenden moderaten Dürren betroffen.

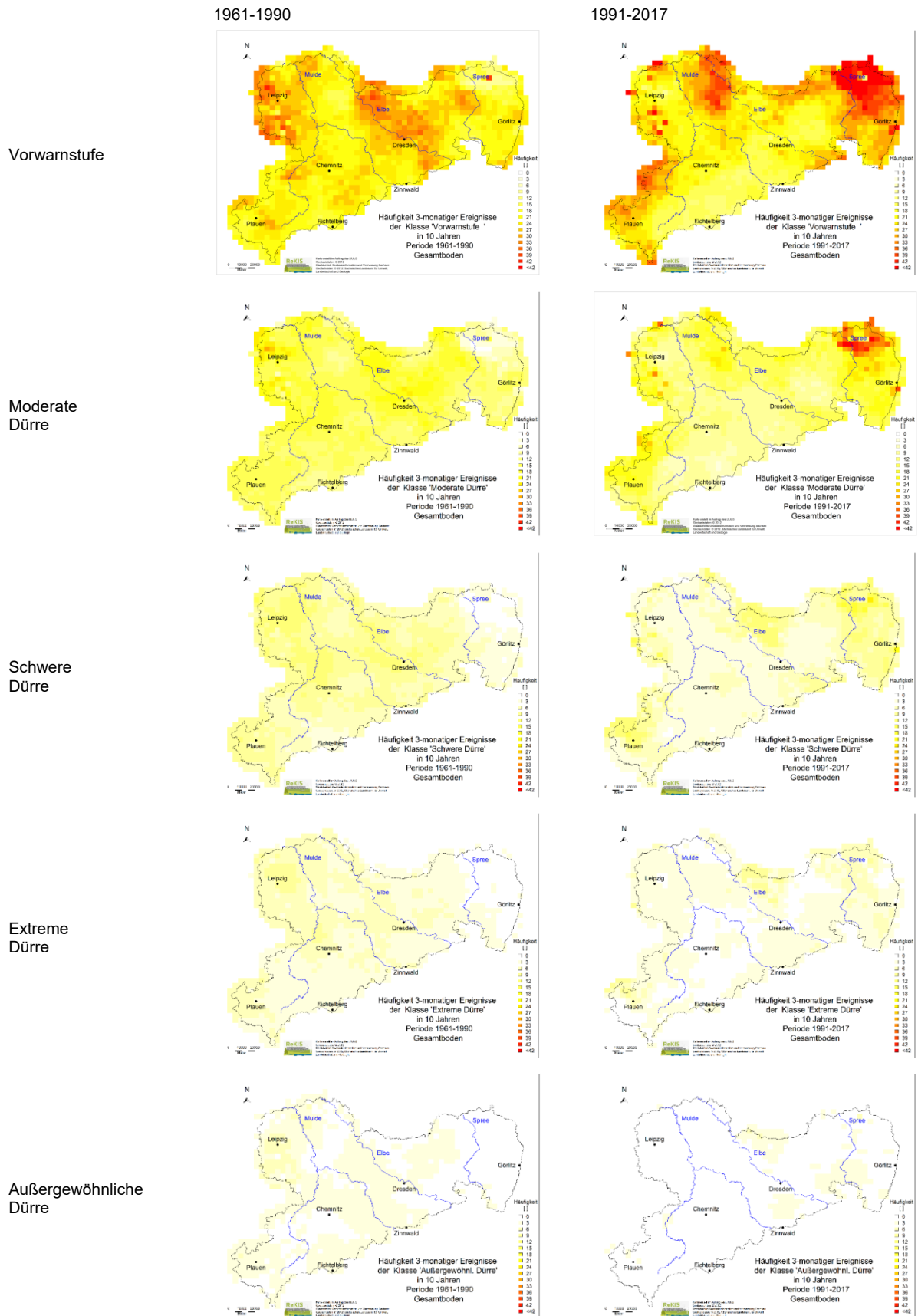


Abbildung 32: Häufigkeit 3-monatiger Ereignisse der 5 Dürreklassen im Gesamtboden in den Perioden 1961–1990 (links) und 1991–2017 (rechts)

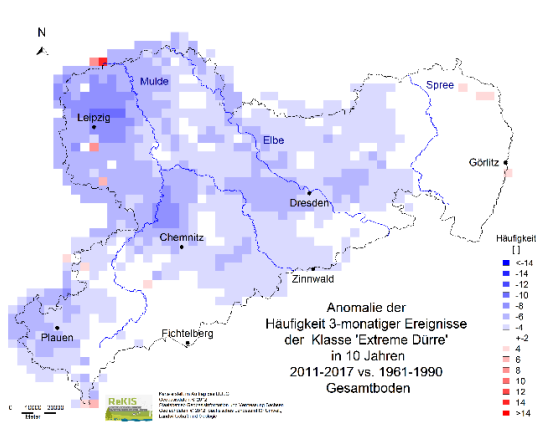
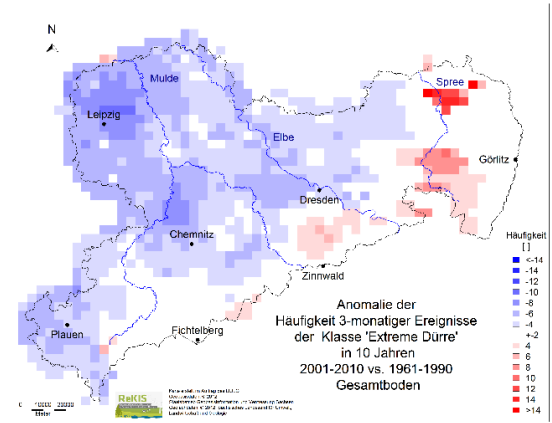
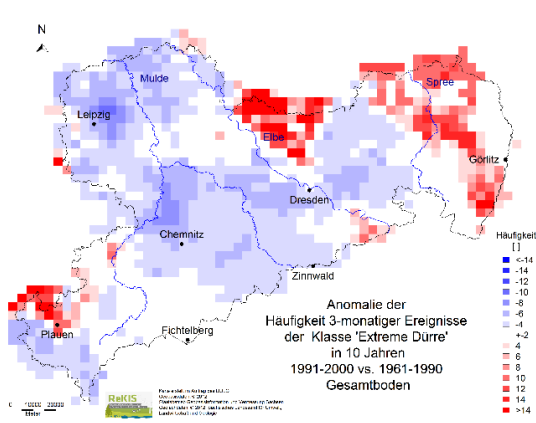
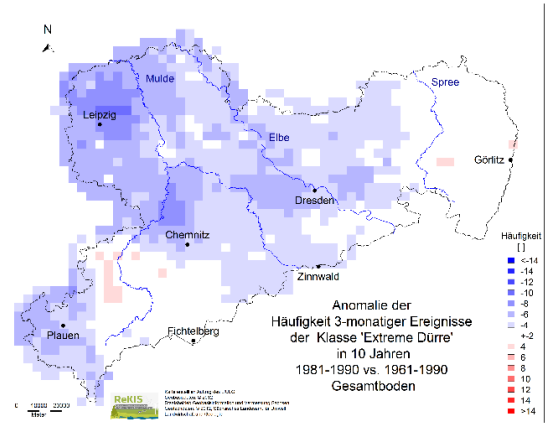
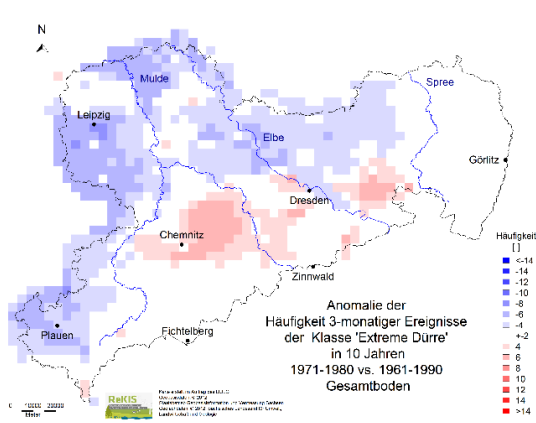
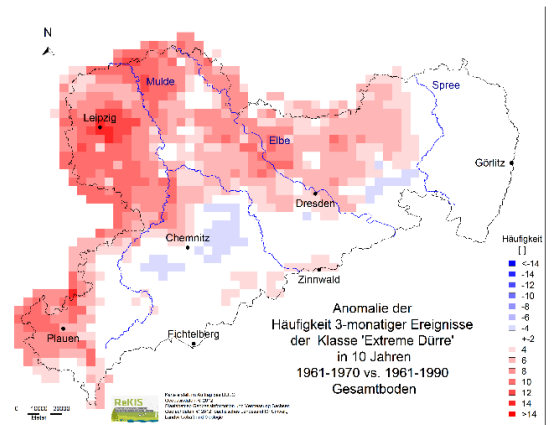
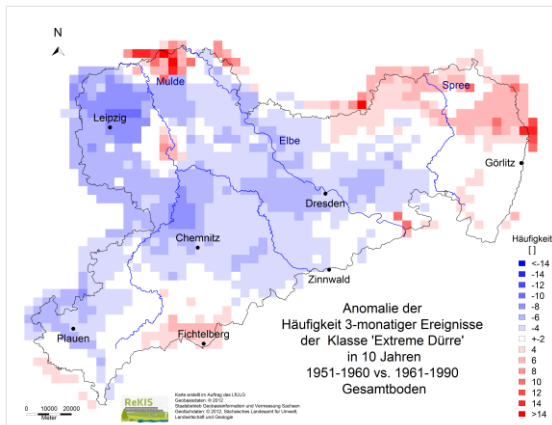


Abbildung 33: Anomalien 3-monatiger Ereignisse „Extremer Dürre“ im Gesamtboden in den Dekaden im Vergleich zu 1961–1990

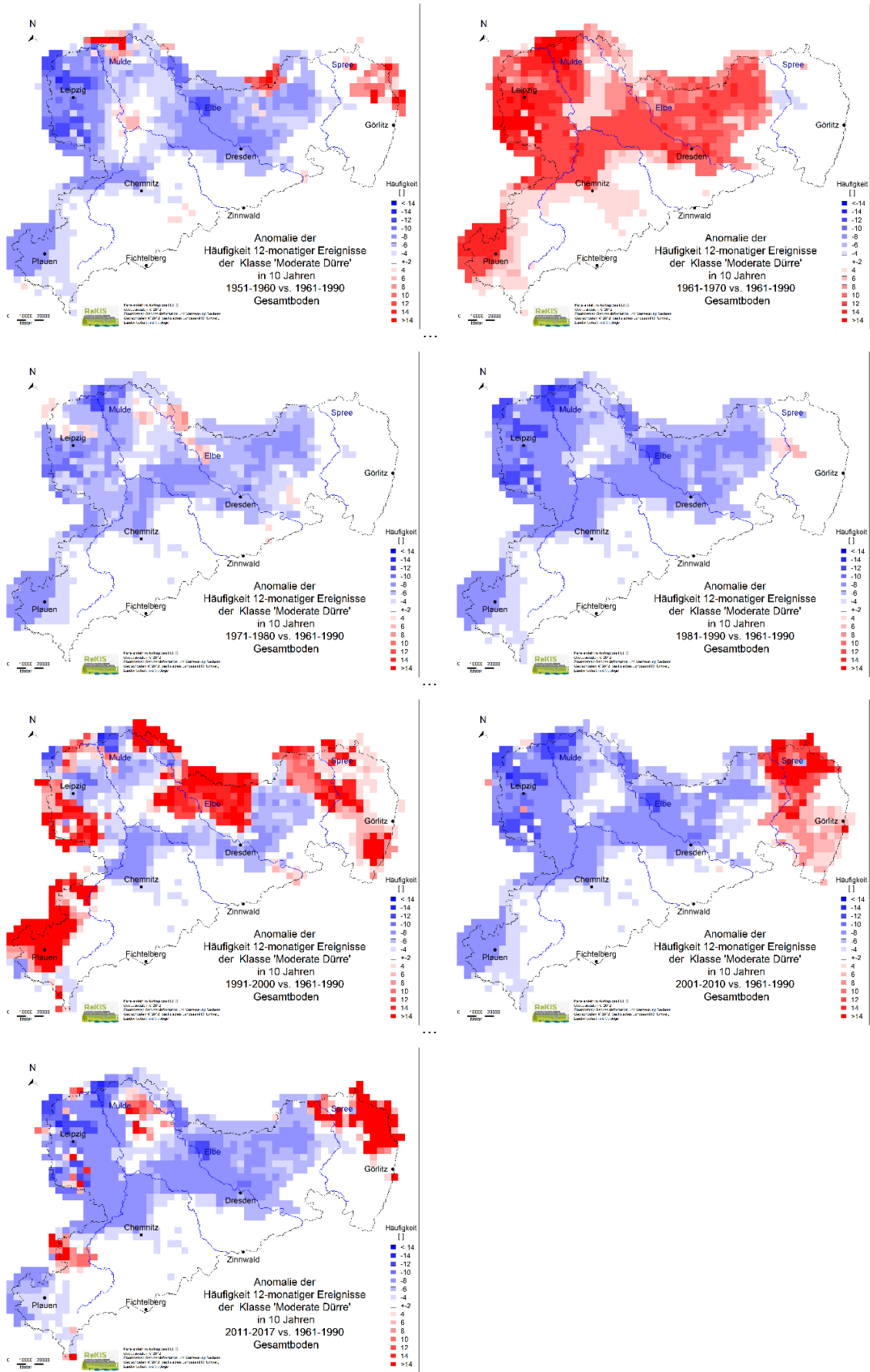


Abbildung 34: Anomalien 12-monatiger Ereignisse „Moderater Dürre“ im Gesamtboden in den Dekaden im Vergleich zu 1961–1990

5.4 Validierung meteorologischer Indizes

5.4.1 Validierung einzelner meteorologischer Indizes mit dem NDVI

Zur Plausibilitätsprüfung wurde der Jahresgang des NDVI einzelner Jahre der Periode 2003–2018 aufgetragen (Abbildung 35). Abgebildet ist das Mittel von 3 Standorten für jede Landnutzung. Farblich hervorgehoben sind die Trockenjahre 2003 und 2008.

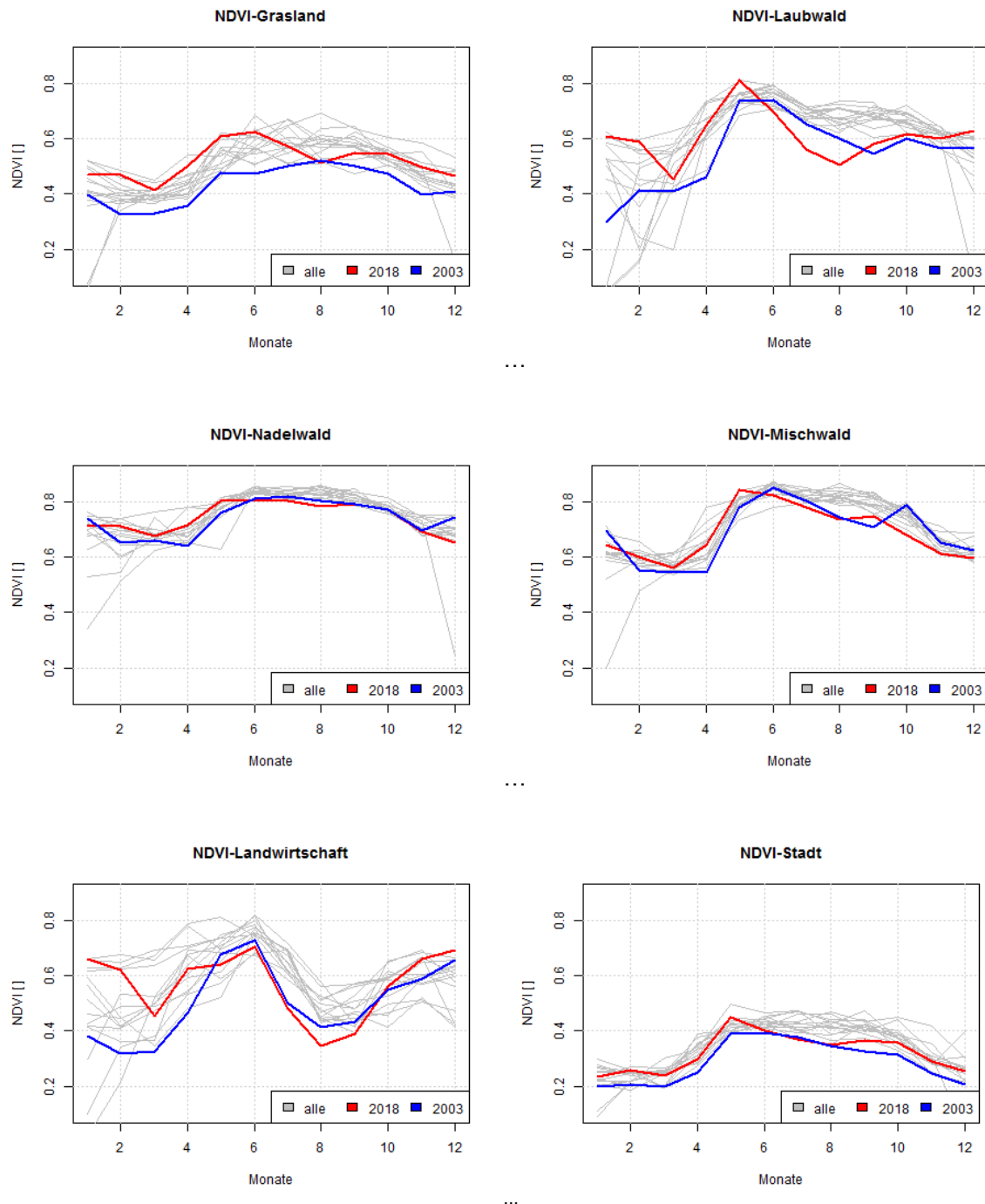


Abbildung 35: NDVI verschiedener Landnutzungen in Sachsen

In der Regel wird der maximale NDVI im Juni erreicht, die Blätter sind photosynthetisch sehr aktiv. In Trockenjahren fallen die NDVI-Werte in der ersten Jahreshälfte nicht notwendigerweise geringer aus. In der Regel wird der Bodenwasserspeicher im Winter aufgefüllt, so dass das Pflanzenwachstum kaum beeinträchtigt wird. Jedoch können trockene Winter in Ausnahmefällen (wie z. B. 2003) auch zu frühzeitigen Einbußen der Pflanzenfitness führen. Häufig wirkt sich die Trockenheit erst im Hochsommer/ Herbst auf die Pflanzen aus; hier liegen die NDVI-Werte von Laub- und Mischwald, Landwirtschaft und sogar in der Stadt deutlich unter dem ‚Normalen‘. Die NDVI Schwankungen in Nadelwäldern sind zwar deutlich geringer, aber die beiden Trockenjahre sind trotzdem erkennbar. Es sei angemerkt, dass auf landwirtschaftlichen Flächen in Trockenperioden neben dem Welken der Pflanzen auch eine frühzeitige Ernte zu den geringen hochsommerlichen NDVI-Werten führt.

Der Abhängigkeit des NDVI erscheint in der ersten Jahreshälfte gering, was plausibel erscheint, da die Bodenfeuchtigkeit i.d.R. für das Pflanzenwachstum genügt. Erst in der 2. Hälfte können die Bodenwasservorräte bei geringem Niederschlag und hoher sommerlicher Verdunstung zur Neige gehen, so dass die Vitalität der Pflanzen beeinträchtigt wird. Die Korrelationsanalyse zwischen NDVI und den meteorologischen Indizes wird daher auf den Zeitraum Mai bis Oktober beschränkt.

Die in Abbildung 36 dargestellten Jahresgänge des NDVI für die Regionen in der Nähe der Klimastationen verdeutlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten bei den Auswirkungen von Trockenheiten. Der Start und der Verlauf der beiden Trockenjahre ähneln den für die einzelnen Landnutzungen. Sind 2003 insbesondere in der ersten Jahreshälfte die Folgen der Trockenheit im NDVI ersichtlich, so ist es 2018 der Sommer/ Herbst. Werden bei vielen Stationen die minimalen NDVI-Werte im Sommer erreicht, so ist das in Dresden und Leipzig nicht der Fall. Diese Beispiele sollen verdeutlichen, dass keine einfachen Zusammenhänge zwischen der atmosphärischen Trockenheit und den Auswirkungen auf die Pflanzen zu erwarten sind. Weitere Einflüsse sind der Boden, die Landbewirtschaftung, die kleineräumige klimatische Variabilität etc.

Monatliche Analyse

Stationsweise wurden die Korrelationskoeffizienten zwischen dem NDVI der sechs Monate der Wachstumsperiode (Mai-Oktober) und den Trockenindizes berechnet. Dem Beispiel für Görlitz in Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass die höchste positive Korrelation im Mai 0,29 beträgt (SPI3, lag=1) und damit nicht signifikant ist (ab ca. 0,5 liegt Signifikanz vor). Der Juni-Wert des NDVI korreliert am stärksten mit dem SPI der Monate Feb-März (SPI2, lag=3). Der stärkste Zusammenhang zwischen NDVI und SPI besteht im Juli ($r=0,84$), wenn über drei Monate aggregiert wird. Mit anderen Worten, die Feuchtigkeitsverhältnisse zwischen Mai und Juli sind entscheidend für die Vitalität der Pflanzen im Hochsommer.

Die maximalen, signifikanten Korrelationen wurden in für alle Stationen und alle Indizes zusammengefasst. Im Mai liegen noch wenige signifikanten Korrelationen vor, die Bodenfeuchte in jeden Fall genügt i.d.R., um die Pflanzen genügend mit Wasser zu versorgen. Der ersten Zeile der Tabelle 6 ist die oben erwähnte Korrelation für Görlitz im Juni zu entnehmen (SPI2, lag=3). Der farblichen Kodierung ist zu entnehmen, dass die Feuchtigkeitsverhältnisse der Monate Juni und Juli am relevantesten für den NDVI sind. Mindestens vier Mal (dunkelgrün) tragen sie bei zwei Stationen signifikant zur Erklärung des NDVIs der Wachstumssaison bei. Mai und August kommen an 2. Stelle. Auch der Zeitraum vor der betrachteten Wachstumsperiode spielt in der Regel eine Rolle, meist ab Februar, teilweise schon ab November des Vorjahres. Des Weiteren ist festzustellen, dass nicht die Feuchtigkeitsverhältnisse eines Einzelmonats am besten den NDVI erklären, sondern über (i.d.R.) 2 bis 4 Monate aggregierte Perioden (mit einer zeitlichen Verschiebung von 0 bis 4 Monaten)⁴. Hier manifestiert sich die Pufferwirkung des Bodens.

⁴ WANG ET AL. (2003) ermittelten Korrelationskoeffizienten von bis zu 0,75, wobei sich die besten Ergebnisse für Aggregationszeiten von 1-2 Monaten und einer einmonatigen (lag=1 Monat) zeitlichen Verschiebung ergaben.

An jeder Station sind die Abhängigkeiten des NDVI von den Feuchtigkeitsverhältnissen etwas verschieden. Görlitz, Plauen und Dresden weisen konsistente und gute Korrelationen auf (rechte Spalte in Tabelle 6), Leipzig und Chemnitz etwas weniger gute. Der Fichtelberg weist keine signifikanten Korrelationen auf. Aufgrund der Höhenlage (> 1200 m) und den damit zusammenhängenden hohen Niederschlagssummen treten kaum Wasserstresssituationen für die Pflanzen auf, die sich im NDVI manifestieren (siehe auch Abbildung 36).

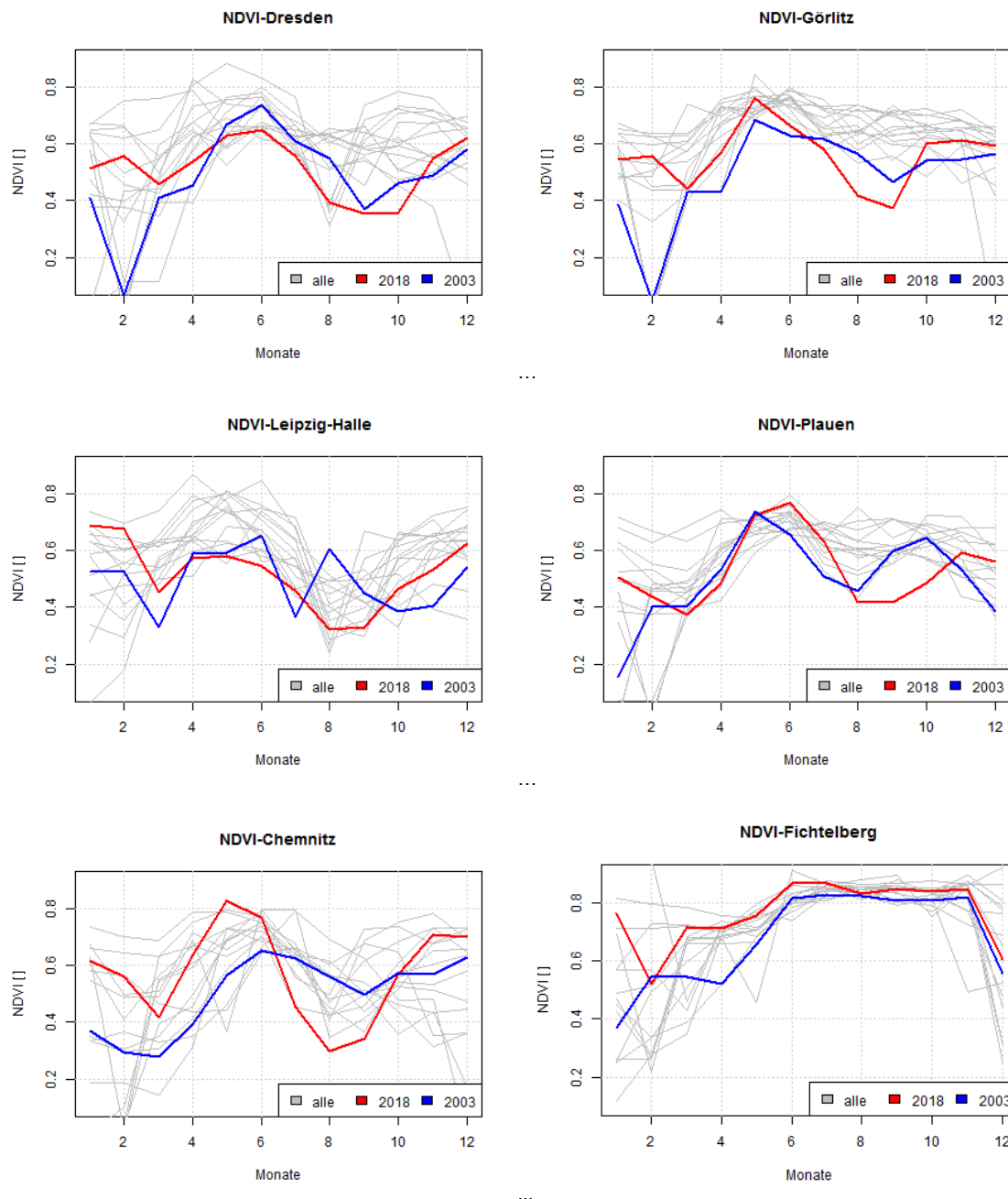


Abbildung 36: Jahresgänge des NDVI für Regionen in der Nähe der Klimastationen für den Zeitraum 2003–2018

SPEI und RDI, welche die Verdunstung als zweiten Einflussfaktor auf die Feuchtigkeitsverhältnisse berücksichtigen, weisen etwas bessere Korrelationskoeffizienten auf. So fanden auch STAGGE ET AL. (2015), dass der SPEI3 am besten zur Abbildung von landwirtschaftlich relevanten Trockenheiten geeignet ist.

Quadriert man die ermittelten signifikanten Korrelationskoeffizienten (0,50 bis 0,87) so wird deutlich, dass etwa 25-75 % der Variabilität des NDVI mit den meteorologischen Indizes erklärt werden kann. In vielen Fällen reichen die meteorologischen Indizes demzufolge nicht aus, um den NDVI ausreichend abzubilden. Da auf den stationsnahen Pixeln auch teilweise eine landwirtschaftliche Nutzung erfolgt, wird der NDVI auch durch das Management (z. B. Ernte oder erneute Einsaat) beeinflusst. Einen direkten Einfluss von Temperaturkennwerten auf den NDVI belegen z. B. WANG ET AL. (2003).

Tabelle 5: Korrelationskoeffizienten zwischen SPI verschiedener Aggregierungszeiträume (SPI-Aggreg.) und zeitlicher Verschiebungen (lag) mit dem NDVI in den Monaten der Wachstumsaison für die Station Görlitz

SPI-Aggreg.	lag	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
1	0	-0.09	0.33	0.61	0.48	0.14	0.43
1	1	0.24	0.17	0.46	0.55	0.54	0
1	2	0.15	-0.05	0.43	0.02	0.34	0.45
1	3	0.01	0.13	-0.13	0.38	0.27	0.25
1	4	-0.3	0.51	-0.17	-0.23	0.3	0.16
2	0	0.08	0.33	0.83	0.68	0.48	0.43
2	1	0.26	0.26	0.57	0.52	0.57	0.35
2	2	0.11	0.11	0.33	0.27	0.46	0.46
2	3	-0.21	<u>0.52</u>	-0.2	0.32	0.36	0.32
2	4	-0.1	0.17	0.18	-0.19	0.34	0.19
3	0	0.14	0.37	<u>0.84</u>	0.64	0.52	0.45
3	1	0.29	0.28	0.53	0.6	0.64	0.4
3	2	-0.13	0.5	0.22	0.23	0.5	0.48
3	3	-0.1	0.27	0.06	0.25	0.39	0.34
3	4	-0.07	0.2	0.21	0.07	0.36	0.33
4	0	0.15	0.4	0.81	<u>0.69</u>	0.59	0.49
4	1	0.07	0.51	0.47	0.57	0.64	0.42
4	2	-0.05	0.3	0.36	0.2	0.53	0.47
4	3	-0.09	0.3	0.12	0.38	0.43	0.44
4	4	-0.4	0.07	0.26	-0.14	0.54	0.35
5	0	0	0.51	0.81	0.63	0.59	0.53
5	1	0.16	0.39	0.5	0.57	0.63	0.41
5	2	-0.04	0.34	0.41	0.27	0.58	0.52
5	3	-0.37	0.14	0.17	0.22	0.51	0.48
5	4	-0.22	0.01	0.24	-0.19	0.27	0.43
6	0	0.09	0.4	0.83	0.62	0.58	0.54
6	1	0.13	0.44	0.49	0.62	0.65	0.46
6	2	-0.32	0.19	0.48	0.16	<u>0.66</u>	0.53
6	3	-0.22	0.05	0.19	0.21	0.3	<u>0.55</u>
6	4	-0.12	-0.01	0.07	0.04	0.31	0.21

Tabelle 6: Signifikante Korrelationen zwischen dem NDVI der Wachstumsaison und dem SPI (oben), SPEI (Mitte) und RDI (unten) an sechs Standorten. Numerisch erfasst sind, welche SPI Aggregierungsstufen (bzw. SPEI, RDI) mit welcher zeitlichen Verschiebung (in Klammern) mit dem NDVI korrelieren. Farblich kodiert ist, wie häufig die SPI Monatswerte signifikant mit dem NDVI korrelieren.

NDVI - SPI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz									2 (3)	3 (0)	4 (0)	3 (1)	6 (3)	zwischen <0.5-0.84
Plauen									5 (2)	4 (0)	4 (0)	3 (1)	1 (0)	zwischen <0.5-0.73
Dresden									3 (4)	1 (1)	4 (1)	3 (3)		zwischen <0.5-0.7
Leipzig-H.									1 (4)	2 (4)	1 (4)		1 (3)	zwischen <0.5-0.66
Chemnitz										1 (1)	4 (0)	6 (2)	1 (0)	zwischen <0.5-0.63
Fichtelberg														<0.50

NDVI - SPEI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz										3 (0)	4 (0)	6 (1)	5 (0)	zwischen <0.50-0.87
Plauen									4 (3)	4 (0)	4 (0)	4 (0)	1 (0)	zwischen <0.50-0.73
Dresden									3 (4)	6 (0)	5 (1)	6 (2)	2 (3)	zwischen <0.50-0.73
Leipzig-H.									1 (4)	2 (4)	6 (4)		1 (3)	zwischen <0.50-0.68
Chemnitz											3 (0)	6 (1)	1 (0)	zwischen <0.50-0.59
Fichtelberg														<0.50

NDVI - RDI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz									4 (1)	3 (0)	4 (0)	6 (2)	5 (0)	zwischen <0.5-0.85
Plauen									4 (3)	3 (0)	4 (0)	4 (0)	1 (0)	zwischen <0.5-0.76
Dresden									3 (4)	4 (0)	4 (1)	3 (3)	3 (2)	zwischen <0.5-0.79
Leipzig-H.									1 (4)	5 (1)			1 (3)	zwischen <0.5-0.64
Chemnitz										2 (1)	2 (0)	1 (2)	1 (0)	zwischen <0.5-0.65
Fichtelberg														<0.5

Legende	
Monat trägt 1x signifikant zur Korrelation mit dem NDVI bei	
Monat trägt 2x signifikant zur Korrelation mit dem NDVI bei	
Monat trägt 3x signifikant zur Korrelation mit dem NDVI bei	
Monat trägt mind. 4x signifikant zur Korrelation mit dem NDVI bei	

Analyse der gesamten Wachstumsaison

Korreliert man die mittleren NDVI-Werte der Wachstumsperiode mit meteorologischen Index-Werten (SPI, SPEI, RDI) des Oktobers mit Aggregationszeiten von 6 bis 24 Monaten, so verbessern sich die Korrelationskoeffizienten nicht gravierend (Abbildung 37). Wie bei der monatsweisen Analyse, zeigen nicht alle Stationen signifikante Zusammenhänge. Die Feuchtigkeitsverhältnisse der Wachstumsperiode (Aggregationszeit = 6 Monate) und in manchen Fällen zusätzlich der 3 bis 6 vorangegangenen Monate korrelieren am stärksten mit dem NDVI. Die Ergebnisse für den SPI und SPEI ähneln sich, die Korrelationen zum RDI fallen geringer aus.

Zusammenfassend sei angemerkt, dass sich die rein meteorologischen Indizes (SPI, SPEI und RDI) für vier von sechs Stationen (Plauen, Görlitz Dresden, Chemnitz) mit dem NDVI plausibilisieren lassen. Die gefundenen Korrelationskoeffizienten entsprechen Werten, die in der Literatur zu finden sind (z.B. PELED et al. 2010: R=0,3–0,6 für SPI3 in Sachsen). Jedoch fanden LOTSCH ET AL. (2003) keine signifikanten Korrelationen zwischen dem SPI5 und dem NDVI in Mitteleuropa.

Die Feuchtigkeitsverhältnisse – repräsentiert durch die Indizes – von Mai (teilweise von Februar) bis August stehen in einem engen Zusammenhang mit dem Vegetationsindex NDVI in der Wachstumsperiode. Im Winter befindet sich ein Großteil der Vegetation in unseren Breiten in einer Ruhepause, weshalb in dieser Zeit keine Zusammenhänge existieren. Im Frühjahr treten durch das Aufweichen der Böden im Winter selten Trockenbedingungen auf, die zu Einschränkungen im Pflanzenwachstum führen.

Am Fichtelberg besteht aufgrund des hohen Niederschlagsangebots und der verminderten potentiellen Verdunstung stets genügend Wasser für das Pflanzenwachstum zur Verfügung, weshalb der NDVI nicht von den untersuchten Indizes beeinflusst ist.

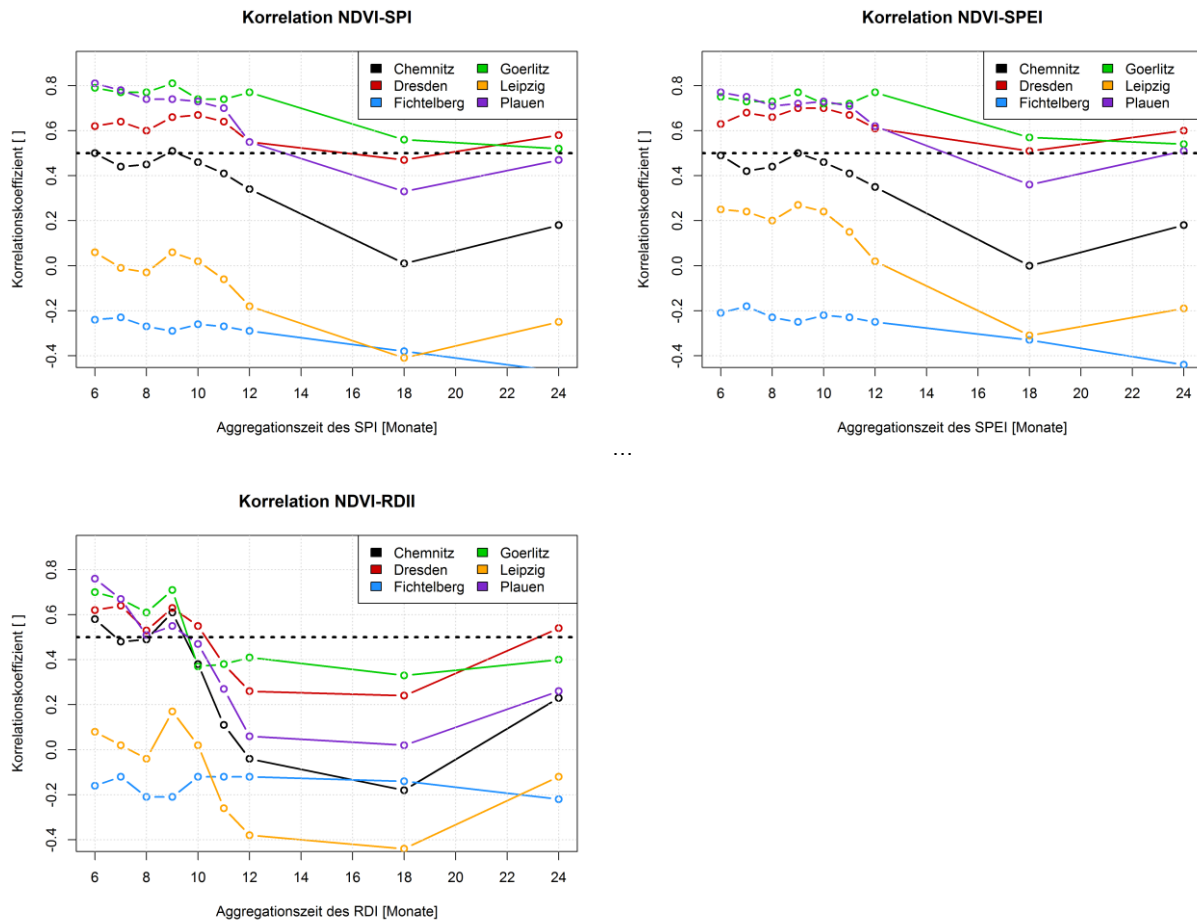


Abbildung 37: Korrelation des über die Wachstumssaison gemittelten NDVI-Wertes mit den meteorologischen Indizes (SPI, SPEI und RDI) verschiedener Aggregationszeiten für sechs Klimastationen. Die Signifikanzschwelle ist schwarz gepunktet.

5.4.2 Validierung einzelner meteorologischer Indizes mit dem SMI

Der Bodenfeuchteindex SMI wurde in der Nähe der sechs Klimastationen ausgelesen, und zwar an den Stellen, an denen auch der NDVI verwendet wurde (Abbildung 9). Der SMI unterliegt keinem Jahrgang, wie die Abbildung 38 belegt. Jedoch sind ausgesprochene Trockenjahre (1982, 2003) deutlich von feuchten Jahren (2010) zu unterscheiden.

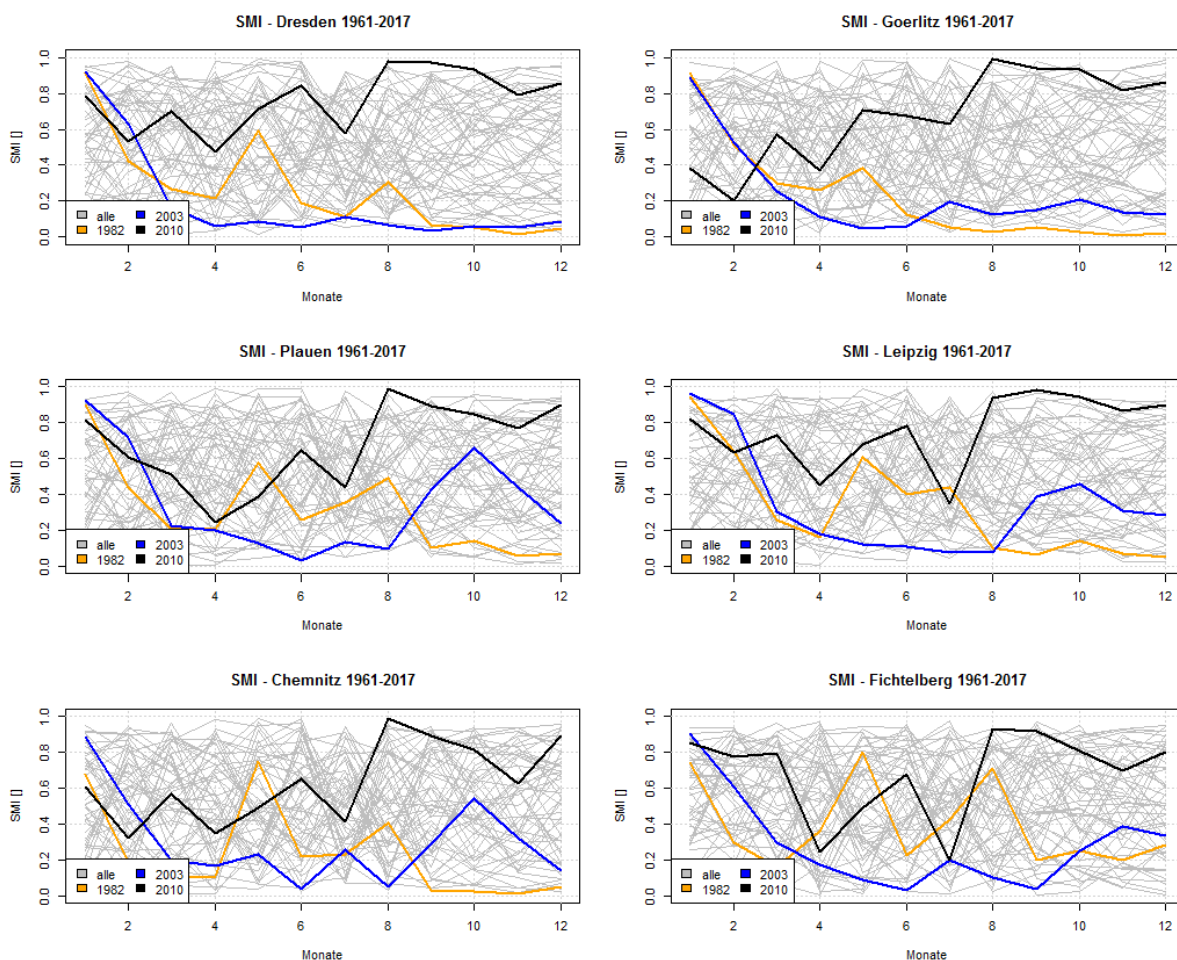


Abbildung 38: Jahrgänge des Bodenfeuchteindex SMI für die untersuchten Standorte. Ein feuchtes Jahr (2010) und zwei trockene (1982, 2003) sind farbig gekennzeichnet.

Monatsweise Analyse

Getrennt für den Ober- und den Gesamtboden wurde der SMI mit den meteorologischen Indizes (SPI, SPEI, RDI) in der Wachstumsperiode korreliert. Signifikante Korrelationen (hier in der Regel $> 0,5$) wurden in Tabelle 7 zusammengefasst. Der Bodenfeuchteindex des Gesamtbodens aller Stationen (bis auf Fichtelberg) weist über die gesamte Wachstumsperiode einen strengen Zusammenhang zu den Feuchtebedingungen der vorangegangenen 4–6 Monate auf (i.d.R. keine zeitliche Verschiebung). Die Analysen stimmen für SPI und SPEI sehr gut überein, der RDI korreliert besser auf der Skala von 2–4 Monaten. Den strengsten Zusammenhang weist der SMI mit dem SPEI auf (wie beim NDVI), es werden 29–72% der Varianz des SMI erklärt. Der SMI des Oberbodens korreliert signifikant, über alle Stationen und die drei Indizes hinweg, mit den Index Werten des jeweiligen Monats und Vormonats (ohne zeitliche Verschiebung). Die Varianz des SMI wird mit 40 – 81 % am besten mit dem SPEI beschrieben.

Die Variabilität der Korrelation hängt auch daran, dass die meteorologischen Indizes rein auf Klimavariablen beruhen und nicht optimiert wurden, um die nichtlinearen und standortspezifischen Zusammenhänge, welche den Bodenwasserhaushalt bestimmen, wiederzugeben (WANG et al., 2015). Lößböden speichern, beispielsweise, mehr Wasser als Sandböden, weshalb Bodenwasserdefizite sich unterschiedlich stark ausprägen, obgleich die klimatischen Randbedingungen ähnlich oder gleich sind.

Tabelle 7: Signifikante Korrelationen zwischen dem Bodenfeuchteindex SMI (Gesamt- bzw. Oberboden) der Wachstumsaison (Mai-Oktober) und den meteorologischen Indizes (SPI, SPEI, RDI) an 6 Stationen. Numerisch erfasst sind, welches Aggregierungsniveau der Indizes mit welcher zeitlichen Verschiebung (in Klammern) signifikant mit dem SMI korrelieren. Farblich kodiert ist, wie häufig die Index-Monatswerte mit dem SMI korrelieren.

SMI-Gesamtboden - SPI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz								6 (0)	4 (0)	5 (0)	6 (0)	6 (0)	6 (0)	zwischen 0.61-0.8
Plauen								6 (0)	5 (0)	4 (0)	5 (0)	6 (0)	6 (0)	zwischen 0.58-0.83
Dresden								6 (0)	5 (0)	2 (0)	4 (0)	4 (0)	5 (0)	zwischen 0.52-0.84
Leipzig-H.								6 (0)	6 (1)	6 (0)	5 (0)	6 (0)	4 (0)	zwischen 0.50-0.69
Chemnitz								3 (0)	5 (0)	3 (0)	4 (0)	5 (0)	5 (0)	zwischen 0.62-0.85
Fichtelberg								2 (0)	3 (0)	3 (0)	2 (0)	3 (0)	4 (0)	zwischen 0.52-0.83

SMI-Gesamtboden - SPEI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz								6 (0)	4 (0)	5 (0)	6 (0)	6 (0)	6 (0)	zwischen 0.59-0.82
Plauen								6 (0)	5 (0)	6 (0)	5 (0)	6 (0)	6 (0)	zwischen 0.64-0.86
Dresden								6 (0)	5 (0)	2 (0)	4 (0)	4 (0)	5 (0)	zwischen 0.63-0.85
Leipzig-H.								6 (1)	6 (1)	6 (0)	5 (0)	6 (0)	6 (0)	zwischen 0.54-0.72
Chemnitz								3 (0)	5 (0)	6 (0)	4 (0)	4 (0)	5 (0)	zwischen 0.66-0.87
Fichtelberg								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	3 (0)	4 (0)	zwischen 0.63-0.84

SMI-Gesamtboden - RDI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz								-	2 (0)	4 (0)	4 (0)	6 (0)	4 (1)	zwischen <0.50-0.80
Plauen								2 (0)	3 (0)	4 (0)	4 (0)	6 (0)	5 (1)	zwischen 0.50-0.85
Dresden								3 (0)	2 (0)	3 (0)	4 (0)	4 (0)	4 (1)	zwischen 0.50-0.84
Leipzig-H.								6 (2)	6 (3)	4 (0)	4 (0)	6 (0)	6 (1)	zwischen 0.52-0.70
Chemnitz								2 (0)	2 (0)	3 (0)	4 (0)	4 (0)	3 (1)	zwischen 0.62-0.86
Fichtelberg								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	3 (0)	3 (1)	zwischen 0.58-0.87

SMI-Oberboden - SPI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.82-0.89
Plauen								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.74-0.86
Dresden								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.70-0.84
Leipzig-H.								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.64-0.83
Chemnitz								2 (0)	2 (0)	2 (0)	1 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.63-0.87
Fichtelberg								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.58-0.82

SMI-Oberboden - SPEI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.86-0.90
Plauen								2 (0)	3 (0)	2 (0)	1 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.82-0.85
Dresden								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.78-0.85
Leipzig-H.								3 (0)	3 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.74-0.82
Chemnitz								2 (0)	2 (0)	2 (0)	1 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.69-0.86
Fichtelberg								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.63-0.82

SMI-Oberboden - RDI

Stat_ID	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Korrelation
Görlitz								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	3 (0)	zwischen 0.80-0.89
Plauen								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	3 (0)	zwischen 0.78-0.87
Dresden								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	3 (0)	zwischen 0.77-0.87
Leipzig-H.								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	4 (0)	zwischen 0.74-0.86
Chemnitz								2 (0)	2 (0)	2 (0)	1 (0)	2 (0)	2 (0)	zwischen 0.72-0.87
Fichtelberg								2 (0)	2 (0)	2 (0)	2 (0)	3 (0)	3 (0)	zwischen 0.58-0.82

Legende

- Monat trägt 1x signifikant zur Korrelation mit dem SMI bei
- Monat trägt 2x signifikant zur Korrelation mit dem SMI bei
- Monat trägt 3x signifikant zur Korrelation mit dem SMI bei
- Monat trägt mind. 4x signifikant zur Korrelation mit dem SMI bei

Analyse der gesamten Wachstumssaison

Der Bodenfeuchteindex korreliert in der Wachstumssaison für alle Stationen und alle Aggregationszeiten (bis auf wenige Ausnahmen) signifikant mit dem SPI und SPEI (Abbildung 39). Am Fichtelberg korreliert der SMI am besten mit SPI6 bzw. SPEI6. Größere Aggregationszeiten vermindern zunehmend den Zusammenhang. Für die übrigen Stationen liegen die Aggregationszeiten für den Gesamtboden deutlich höher: Chemnitz 9, Plauen 11, Görlitz und Dresden 18 und Leipzig 24 Monate. Das bedeutet, dass der SMI des Gesamtbodens ein „sehr langes Gedächtnis besitzt“. Die Korrelation des SMI des Oberbodens sind etwas höher als im Gesamtboden und weisen das Maximum bei ca. 7 Monaten auf. Das „Gedächtnis“ beschränkt sich demzufolge in etwa auf die Wachstumssaison.

Die Korrelation mit dem RDI sind prinzipiell geringer als mit SPI und SPEI.

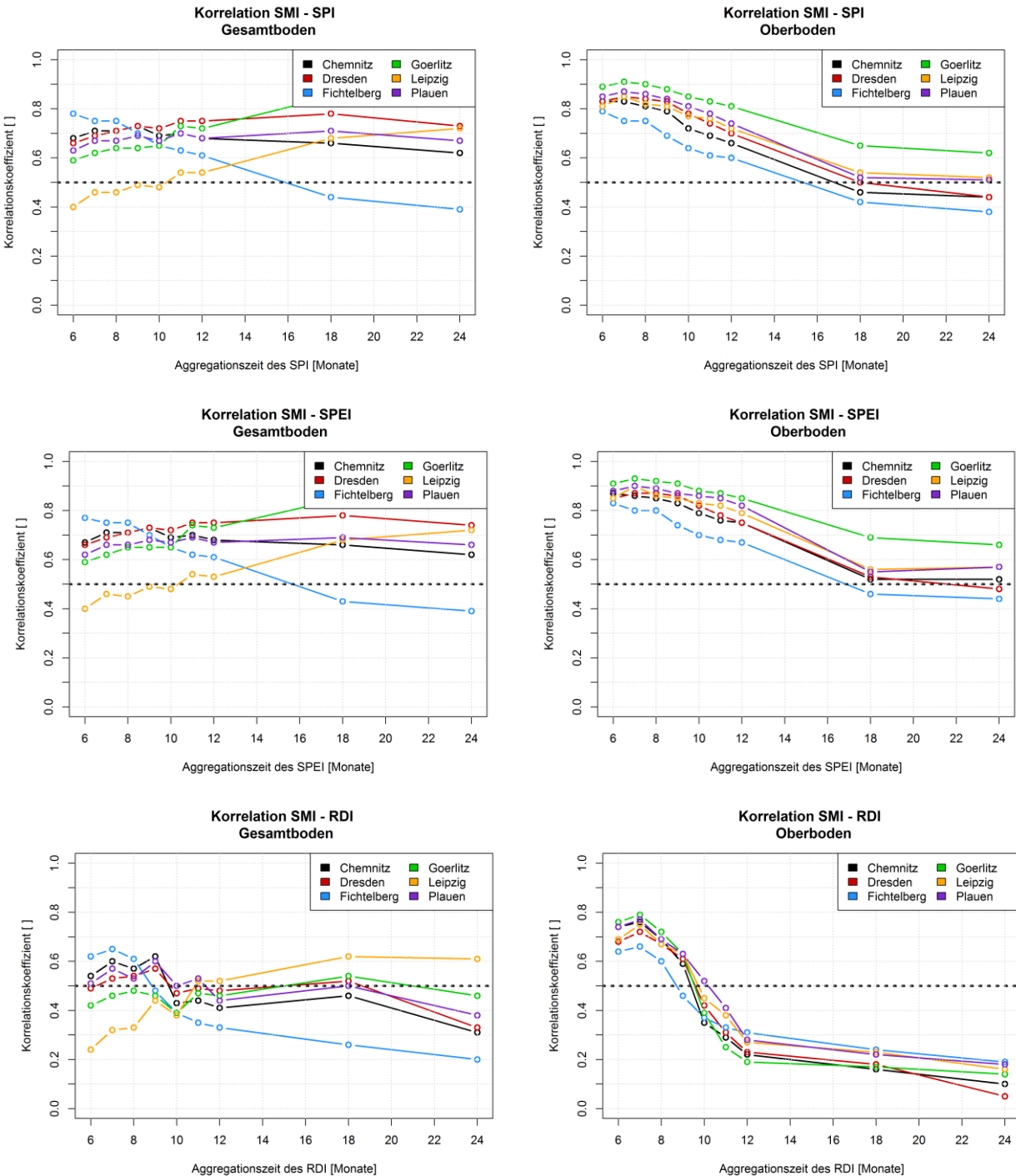


Abbildung 39: Korrelationen des über die Wachstumssaison gemittelten SMI des Gesamtbodens (links) und Oberbodens (rechts) mit den meteorologischen Indizes (SPI, SPEI, RDI) verschiedener Aggregationszeiten (von 6 bis 24 Monate) für sechs Klimastationen. Die Signifikanzschwelle ist schwarz gepunktet.

5.4.3 Kombination von meteorologischen Indizes

Ansatz 1

Um zu eruieren, ob eine Kombination von Indizes den einzelnen Indizes bei der Detektion von Trockenperioden überlegen ist, wurden die Korrelationen zum SMI des Ober- und Gesamtbodens berechnet. Untersucht wurden die Beziehungen unten trockenen Bedingungen, das heißt, nur SMI-Werte unterhalb verschiedener SMI-Schwellwerte wurden verwendet. In Tabelle 8 und

Tabelle 9 sind die Ergebnisse für SMI-Werte $< 0,3$ zusammengestellt. Für alle drei Aggregationszeiten korreliert der SPEI als Einzelindex am besten mit SMI_{Ober} . Für 12 und 24 Monate weist der SPI die stärkste Korrelation mit dem SMI_{Ges} auf. Eine arithmetische oder gewichtete Mittelung führen nur in seltenen Fällen zu einer Verbesserung. Lediglich eine multiple lineare Regression unter Nutzung aller drei Indizes führt stets zu einer Verbesserung. Da die Regressionskoeffizienten sich von Station zu Station unterscheiden, wird in Ansatz 2 versucht, einen verallgemeinerbaren Zusammenhang abzuleiten. Die Ergebnisse für andere Trockenheitsschwellwerte ($SMI < 0,2$ oder $0,1$) unterscheiden sich kaum von den für $SMI < 0,3$ besprochenen (nicht gezeigt hier).

Tabelle 8: Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen dem SMI des Oberbodens mit einzelnen meteorologischen Indizes sowie Kombinationen dieser für verschiedene Aggregationszeiten der Indizes. Werte verwendet unterhalb des SMI Schwellwertes 0,3. Fett markiert ist der jeweils höchste Korrelationskoeffizient, unterstrichen die Fälle, in denen eine Mittelung zu einer Verbesserung führt (Arithmetische Mittelung AM, gewichtete Mittelung GM, Multiple Lineare Regression MLR)

Station	SPI	SPEI	RDI	AM	GM	MLR
Aggregationszeit: 1 Monat						
Chemnitz	0.30	0.33	0.21	0.31	0.27	0.31
Dresden	0.15	0.16	0.09	0.15	0.10	0.10
Fichtelberg	0.10	0.11	0.09	0.10	0.10	0.12
Görlitz	0.21	0.21	0.14	0.21	0.17	0.20
Leipzig	0.10	0.17	0.01	0.11	0.11	0.30
Plauen	0.21	0.25	0.23	0.23	0.26	0.27
Aggregationszeit: 3 Monate						
Chemnitz	0.49	0.49	0.40	0.47	0.49	0.50
Dresden	0.40	0.43	0.36	0.41	0.42	0.43
Fichtelberg	0.23	0.24	0.18	0.22	0.23	0.27
Görlitz	0.50	0.50	0.40	0.48	0.50	0.52
Leipzig	0.46	0.51	0.39	0.47	0.50	0.52
Plauen	0.52	0.55	0.46	0.52	0.54	0.56
Aggregationszeit: 6 Monate						
Chemnitz	0.71	0.76	0.59	0.71	0.74	0.76
Dresden	0.59	0.60	0.54	<u>0.61</u>	<u>0.61</u>	0.61
Fichtelberg	0.39	0.44	0.23	0.37	0.41	0.54
Görlitz	0.50	0.53	0.47	0.53	0.53	0.54
Leipzig	0.49	0.47	0.55	0.54	0.50	0.56
Plauen	0.72	0.76	0.60	0.73	0.75	0.76

Tabelle 9: wie Tabelle 8, jedoch für Gesamtboden

Station	SPI	SPEI	RDI	AM	GM	MLR
Aggregationszeit: 12 Monate						
Chemnitz	0.51	0.52	0.26	0.47	0.51	0.54
Dresden	0.55	0.52	0.26	0.51	0.54	0.56
Fichtelberg	0.17	0.22	0.08	0.16	0.19	0.36
Görlitz	0.38	0.37	0.17	0.37	0.38	0.39
Leipzig	0.36	0.23	0.2	<u>0.31</u>	<u>0.29</u>	0.39
Plauen	0.48	0.38	0.38	<u>0.46</u>	<u>0.44</u>	0.51
Aggregationszeit: 24 Monate						
Chemnitz	0.22	0.2	0.09	0.18	0.2	0.27
Dresden	0.43	0.37	0.1	0.32	0.37	0.53
Fichtelberg	0.06	0.1	0.04	0.07	0.08	0.28
Görlitz	0.38	0.35	0.06	0.3	0.35	0.42
Leipzig	0.6	0.46	0.25	<u>0.53</u>	<u>0.54</u>	0.61
Plauen	0.64	0.59	0.55	<u>0.62</u>	<u>0.62</u>	0.64

Ansatz 2

Auf Grundlage der Korrelationsanalysen (5.4.1 und 5.4.2) wurden sinnvolle Prädiktoren ausgewählt:

- Für den SMI sind das der SPI und der SPEI der Aggregationszeiträume 1 bis 12 Monate (wobei bei den Aggregationszeiträumen von 1 bis 2 Monaten eine zeitliche Verschiebung von 1 Monat zugelassen wurde). Da an den RDI 1 | 2 keine Verteilungsfunktion sinnvoll angepasst werden konnte, werden nur RDI 3 bis 12 Monate verwendet.
- Für den NDVI sind das der SPI und SPEI 1–12 (bei SPI und SPEI 1–2 auch mit zeitlicher Verschiebung von bis zu 4 Monaten) sowie der RDI 3 bis 12 Monate.

Es wurde eine schrittweise multiple lineare Regression zur Ermittlung der geeignetsten Prädiktoren (meteorologische Kennwerte) durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde stationsweise eine Regressionsbeziehung ermittelt, wobei die Prädiktoren frei wählbar, aber die Anzahl auf drei beschränkt wurde (nachfolgend benannt: *auto*). Für Chemnitz ergibt sich für das Sommerhalbjahr und bei einer Obergrenze des SMI_{Ges} von 0,2:

- Regressionsmodell: $SMI_{Ges} = 0.194 + 0.014 * SPEI_{2.lag1} + 0.043 * SPEI_4 + 0.034 * SPEI_{12}$
- Bestimmtheitsmaß (adjustiert): 0,38

Für all sechs Stationen wurden – separat für jedes Halbjahr – die besten Prädiktoren ermittelt. Diese unterscheiden sich von Station zu Station. Um zu testen, ob ein verallgemeinerbarer, regional gültiger Zusammenhang ableitbar ist, wurden die am häufigsten vorkommenden ersten, zweiten und dritten Prädiktoren ermittelt.

- Für das Sommerhalbjahr sind das für den SMI_{Ges} : SPEI 2, SPI 6 und SPI 12.
- Für das Winterhalbjahr sind das für den SMI_{Ges} : SPEI 2.lag1, SPEI 9 und SPI 12.

Mit diesen drei Prädiktoren wurde erneut eine Regression gerechnet (nachfolgend benannt: *manual*). Für Chemnitz ergibt sich beispielsweise für das Sommerhalbjahr und bei einer Obergrenze des SMI_{Ges} von 0,2:

- Regressionsmodell: $SMI_{Ges} = 0.166 + 0.020 * SPEI_2 + 0.029 * SPI_6 + 0.014 * SPI_{12}$
- Bestimmtheitsmaß (adjustiert): 0,23

Die für das Gesamtjahr gerechneten Regressionen waren in den meisten Fällen weniger gut als für die Halbjahre, weshalb im Folgenden nur die Ergebnisse des SHJ und WHJ präsentiert werden. Der Vergleich der automatischen und der manuellen MLR für allen Stationen (Tabelle 10 und Tabelle 11) zeigt eine klare Unterlegenheit der manuellen Regression. Das heißt, die Festlegung auf gemeinsame Prädiktoren für alle Stationen führt zu signifikanten Einbußen in der Güte der Regressionsmodelle.

Die Güte der Regressionsmodelle unterscheidet sich von Station zu Station, in Abhängigkeit von der SMI-Schwelle und der Jahreszeit. Es zeichnet sich keine klare Tendenz ab, ob der SMI_{Ges} besser im WHJ oder im SHJ abgebildet wird. Unter sehr trockenen Bedingungen ($SMI \leq 0,05$) betragen die erklärten Varianzen im SHJ bis zu 86% (Chemnitz), können mit 31% aber auch deutlich darunterliegen (Dresden). Im WHJ können bis zu 77% der Varianz erklärt werden (Dresden), in einigen Fällen aber auch 0%.

Für den Oberboden wurden folgende am häufigsten vorkommende Prädiktoren ermittelt:

- Für das Sommerhalbjahr sind das für SMI_{Ober} : SPEI2, RDI4, SPEI8
- Für das Winterhalbjahr sind das für SMI_{Ober} : SPEI1.lag1, SPI6, RDI12

Sehr trockene Ereignisse ($SMI_{Ober} < 0,1$) können besser als moderate Ereignisse abgebildet werden (Tabelle 11). So beträgt die erklärte Varianz für Plauen, Chemnitz und Leipzig mehr als 42%, wohingegen für Dresden, Görlitz und Fichtelberg zwischen 32-39% erklärt werden. Auch hier zeichnet sich keine klare Tendenz bezüglich der Güte im WHJ oder SHJ ab. Wie auch im Oberboden ist der Ansatz gemeinsamer Prädiktoren (*manual*) kaum geeignet die Bodenwasserverhältnisse unter trockenen Bedingungen abzubilden.

In der Zusammenschau zeigt sich, dass für den Gesamtboden bessere Regressionsbeziehungen gefunden wurden als für den Oberboden. Eine Kombination der Trockenindizes ist nur sinnvoll mittels einer standort-spezifischen Festlegung der relevanten Trockenindizes (automatische Multiple Regression).

Einschränkend sei vermerkt, dass es sich um eine punktuelle Analyse handelt, in der Daten von Klimastationen mit NDVI und SMI Daten der Umgebung (repräsentativ, aber einige Kilometer entfernt) abgeglichen werden. Unsicherheiten in der Repräsentativität können sich aus dem lokalen Klima, den Bodenverhältnissen und der Landbedeckung ergeben.

Tabelle 10: Bestimmtheitsmaß (R^2) der automatischen (*auto*) und der manuellen (*manual*) Regressionsanalyse für den SMI des Gesamtbodens für verschiedene Schwellwerte des SMI, Stationen und Halbjahre. Fett markiert sind die maximalen Bestimmtheitsmaße.

Zeitraum	SMI Schwelle	Chemnitz automanual	Dresden automanual	Fichtelberg automanual	Görlitz automanual	Leipzig automanual	Plauen automanual						
SHJ	0.05	0.86	0.19	0.31	-0.1	0.45	0.13	0.77	-0.02	0.8	-0.1	0.48	-0.28
WHJ	0.05	0.42	0.2	0.75	-0.08	0.63	0.32	0.71	0.04	0.64	0.2	0.58	-0.07
SHJ	0.1	0.32	0.28	0.46	0.33	0.51	0.44	0.24	0.03	0.3	0.13	0.34	0.05
WHJ	0.1	0.49	0.23	0.48	0.31	0.33	0.16	0.4	0.03	0.3	0.07	0.3	0.06
SHJ	0.2	0.38	0.23	0.29	0.18	0.39	0.36	0.34	0.29	0.22	0.18	0.32	0.21
WHJ	0.2	0.54	0.38	0.41	0.33	0.11	0.01	0.29	0.23	0.33	0.2	0.17	0
SHJ	0.3	0.46	0.37	0.29	0.27	0.4	0.32	0.39	0.33	0.3	0.28	0.44	0.41
WHJ	0.3	0.64	0.57	0.56	0.55	0.17	0.09	0.42	0.38	0.26	0.18	0.26	0.19

Tabelle 11: wie Tabelle 10, jedoch für den Oberboden

Zeitraum	SMI Schwelle	Chemnitz automanual	Dresden automanual	Fichtelberg automanual	Görlitz automanual	Leipzig automanual	Plauen automanual
SHJ	0.05	0.78	-0.11		0.43	0.06	-0.55
WHJ	0.05	0.51	0.14	0.55	0.02	0.41	-0.21
SHJ	0.1	0.33	0.07	0.32	0.00	0.43	0.37
WHJ	0.1	0.43	0.37	0.43	0.34	0.36	0.06
SHJ	0.2	0.35	0.25	0.30	0.21	0.37	0.34
WHJ	0.2	0.32	0.26	0.44	0.30	0.06	0.01
SHJ	0.3	0.40	0.29	0.29	0.25	0.40	0.34
WHJ	0.3	0.43	0.35	0.42	0.34	0.13	0.07

Neben dem Bodenfeuchteindex wird der NDVI genutzt, um die geeignetste Kombination von Trockenindizes zur Beschreibung der Trockenheit zu ermitteln.

Für Chemnitz – beispielsweise – ergibt sich zur Beschreibung des NDVI der Monate Mai und Oktober folgende Beziehungen:

■ $NDVI_{05} = 0.674 - 0.843 \cdot SPI2.lag0 - 0.776 \cdot SPI2.lag2 + 1.148 \cdot SPI4.lag0 \quad R^2_{adj} = 0,69$

■ $NDVI_{10} = 0.618 + 0.131 \cdot SPEI8.lag4 - 0.342 \cdot RDI10.lag2 + 0.221 \cdot RDI12.lag3 \quad R^2_{adj} = 0,81$

Für den NDVI im Mai sind die meteorologischen Bedingungen von Februar bis Mai relevant sind. Die Pflanzenfitness im Oktober hängt von den meteorologischen Bedingungen ab, die mehr als ein Jahr zurückliegen. Gab es überjährlich genügend Niederschlag und keine übermäßige Verdunstung so bestimmt dieser (im Boden und Grundwasser) gespeicherte Wasservorrat den herbstlichen NDVI.

Poolt man alle NDVI Werte der Wachstumsaison und ermittelt die Regression, ergibt sich eine wesentlich schwächere Regressionsbeziehung. Die Abbildung der Abhängigkeiten von unterschiedlichen Zeitskalen in einer Regression gelingt nicht:

■ $NDVI_{5-10} = 0.606 + 0.068 \cdot RDI8.lag0 - 0.076 \cdot RDI12.lag1 + 0.039 \cdot SPI12.lag3 \quad R^2_{adj} = 0,16$

Ist man jedoch nur am mittleren NDVI der Wachstumsaison interessiert, so wird das unter Berücksichtigung des SPI und RDI der Periode März-Oktober (6-8 Monate) recht gut abgebildet:

■ $NDVI_{ws} = 0.608 + 0.125 \cdot SPI6 - 0.174 \cdot SPI8 + 0.082 \cdot RDI8 \quad R^2_{adj} = 0,60$

Nutzt man die am häufigsten vorkommenden Prädiktoren aus der monatlichen Analyse (SPEI2.lag1, SPEI7.lag2, SPEI12.lag3) zur Erstellung einer Regressionsbeziehung (*manuell*), so fällt diese – wie schon beim SMI – durch geringe erklärte Varianzen auf.

Das am Beispiel Chemnitz beschriebene Verhalten trifft generell ähnlich für die anderen Stationen zu, wie die Tabelle 12 belegt. Die Beschreibung des NDVI an verschiedenen Standorten Sachsens mit einheitlichen Trockenindizes gelingt nur für einige Stationen (Görlitz und Plauen). Meist sind zur Abbildung der lokalen Unterschiede andere Prädiktoren günstiger.

Tabelle 12: Bestimmtheitsmaße der Automatischen Multiplen Regression (auto) und der Regression der drei Prädiktoren vorgegeben wurden (manuell). Ergebnisse der einzelnen Monate von Mai bis Oktober, eines Pools aller Werte (5-10) und des Mittelwertes der Wachstumsperiode (WP).

Monat	Chemnitz		Dresden		Fichtelberg		Görlitz		Leipzig		Plauen	
	auto	manuell	auto	manuell	auto	manuell	auto	manuell	auto	manuell	auto	manuell
5	0.69		0.47		0.66		0.52		0.80		0.60	
6	0.74		0.60		0.75		0.83		0.80		0.76	
7	0.77		0.86		0.59		0.92		0.62		0.80	
8	0.69		0.70		0.60		0.82		0.84		0.81	
9	0.72		0.90		0.68		0.81		0.70		0.76	
10	0.81		0.77		0.61		0.76		0.80		0.81	
5-10	0.16		0.25		0.11		0.15		0.18		0.26	
WP	0.60	0.11	0.61	0.38	0.24	0.00	0.74	0.64	0.74	0.15	0.67	0.61

Ansatz 3

Um flächenhafte Aussagen zum Trockenheitsstatus in Sachsen zu ermöglichen, und hierbei einen möglichst einfachen und in der Praxis umsetzbaren Ansatz zu entwickeln, wurde für jede Rasterzelle die maximale Korrelation zwischen dem SMI (getrennt für Ober- und Gesamtboden) und dem SPEI verschiedener Aggregierungsstufen für den Zeitraum 1961–2018 ermittelt (Abbildung 40). Für den Oberboden weisen im Berg- und Hügelland der SPEI 2 und 3 und im Flachland der SPEI 4 die besten Korrelationen auf. Für den Gesamtboden zeigt sich ein Gradient mit maximalen Korrelationen im Bergland zum SPEI 5–7 bis hin zu SPEI 36 im Flachland.

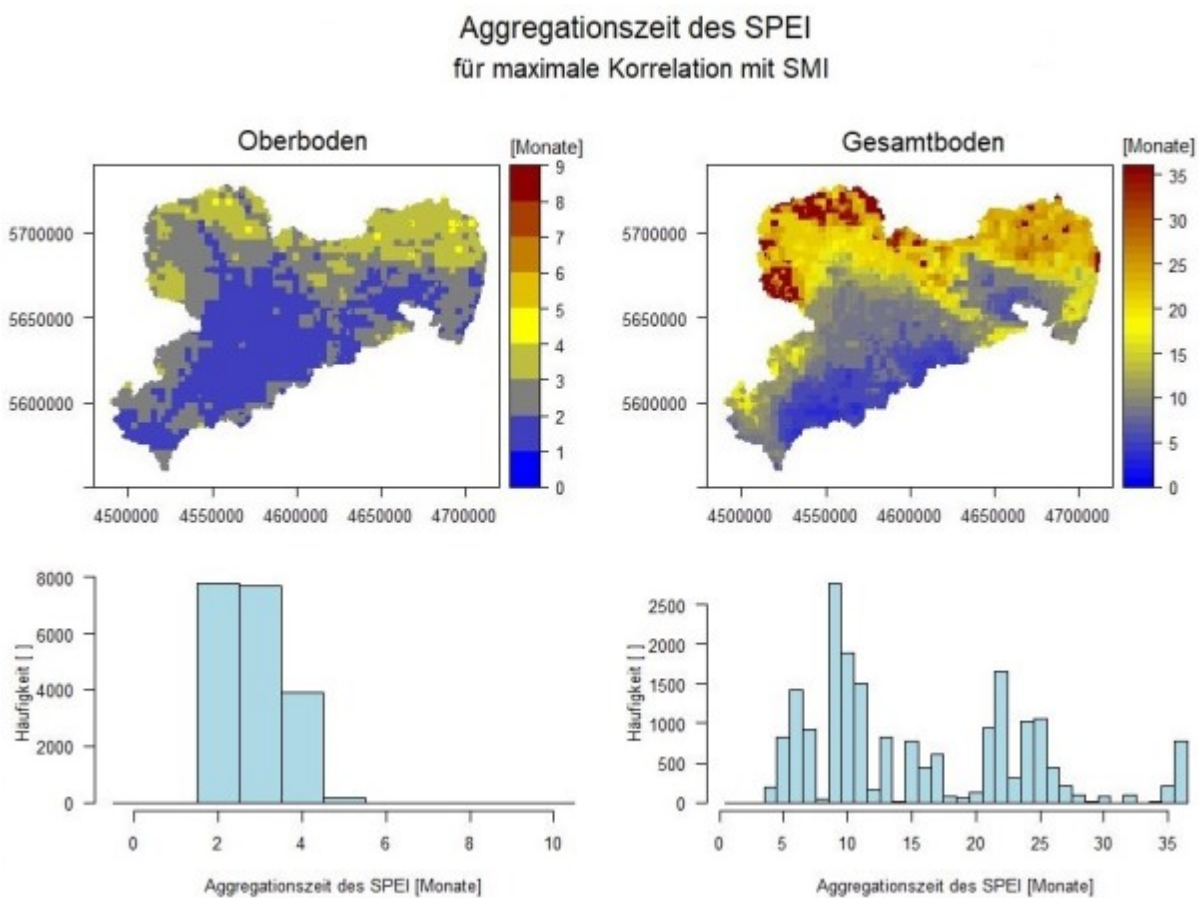


Abbildung 40: Maximale Korrelation zwischen dem SMI (links Ober- und rechts Gesamtboden) und dem SPEI verschiedener Aggregierungsstufen

Für den Oberboden wurden getrennt für jede Rasterzelle die Koeffizienten einer Multiplen Linearen Regression (MLR) mit den Prädiktoren SPEI 2, 3, 4 ermittelt. Für den Gesamtboden wurde eine Variante mit drei Prädiktoren (SPEI 6, 9, 22) und eine mit fünf Prädiktoren (SPEI 6, 9, 10, 22, 36) getestet. Die Koeffizienten der MLR sind separat abgespeichert und können für eine Vorhersage des SMI verwendet werden. Das Bestimmtheitsmaß der MLR in Abbildung 41 zeigt für den gesamten Datenbereich (von feucht bis trocken) im Oberboden Werte zwischen 0,5 und 0,8. Für den Gesamtboden sind die Regressionsmodelle zuverlässiger mit Werten zwischen 0,5 und 0,9 (wobei das Modell mit 5 Prädiktoren überlegen ist). Betrachtet man die Performance des Modells unter Trockenbedingungen (für SMI < 0,3), so zeigt sich eine deutliche Verschlechterung: im Oberboden beträgt das Bestimmtheitsmaß maximal 0,5, im Gesamtboden 0,8. In allen Darstellungen ist erkennbar, dass die bergigen Regionen weniger gut als die flacheren Regionen abgebildet werden können.

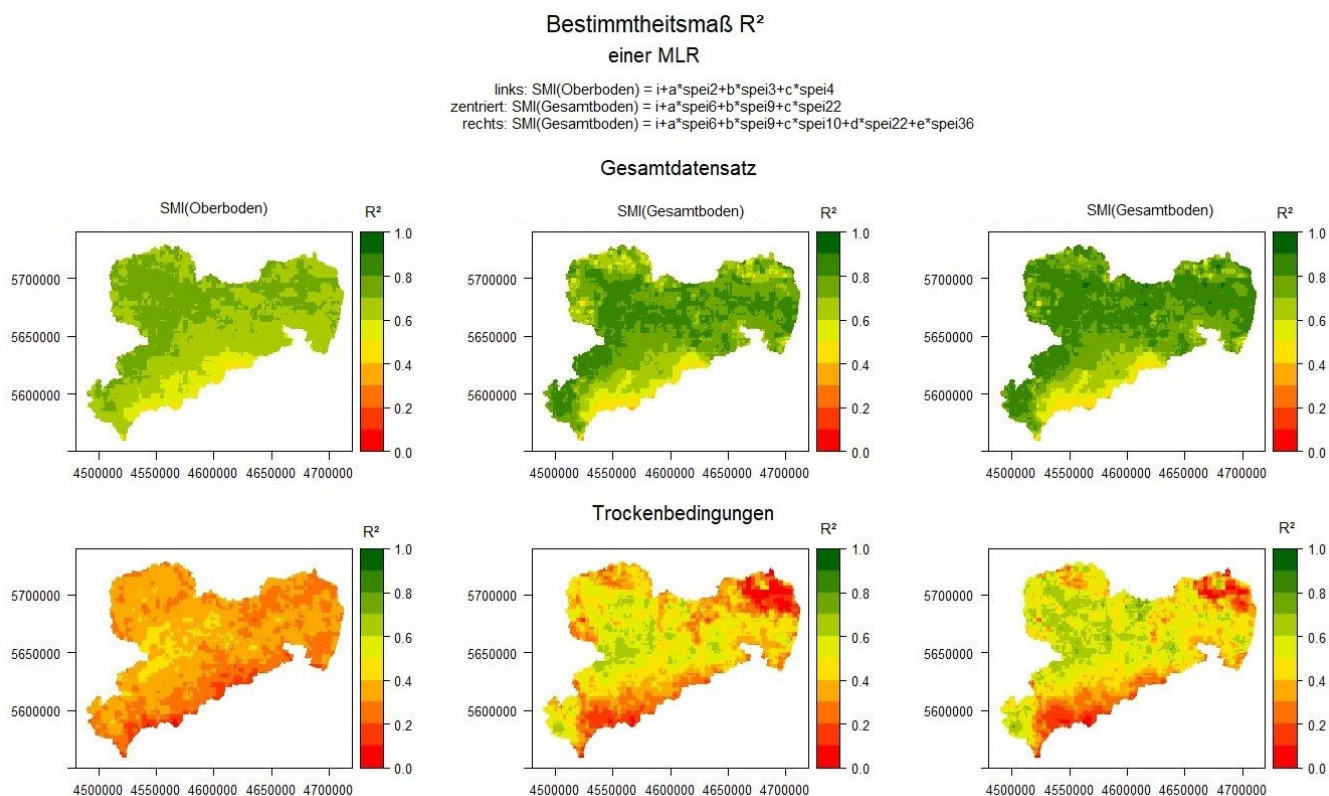


Abbildung 41: Bestimmtheitsmaß der Multiplen Linearen Regressionen für den Oberboden (links) und Gesamtboden, für den Gesamten Datensatz und unter Trockenbedingungen

Ob prinzipiell und wie sicher eine Trockenheit vorausgesagt werden kann, zeigen die Bewertungsmaße in Abbildung 42 und Abbildung 43. Positiv bedeutet, dass ein Trockenereignis modelliert wird, und negativ, dass es nicht modelliert wird. Richtig und Falsch stehen dafür, ob das Modell den Beobachtungen entspricht. Wird ein beobachtetes Trockenereignis durch das SPEI-Modell wiedergegeben, so spricht man von einem Treffer oder der richtigen positiven Rate. Diese beträgt ca. 0,6 im Oberboden. Wesentlich besser werden normale Feuchtigkeitsverhältnisse wiedergegeben (unten rechts, >0,9). Für den Gesamtboden werden beide Raten zuverlässiger als für den Oberboden geschätzt.

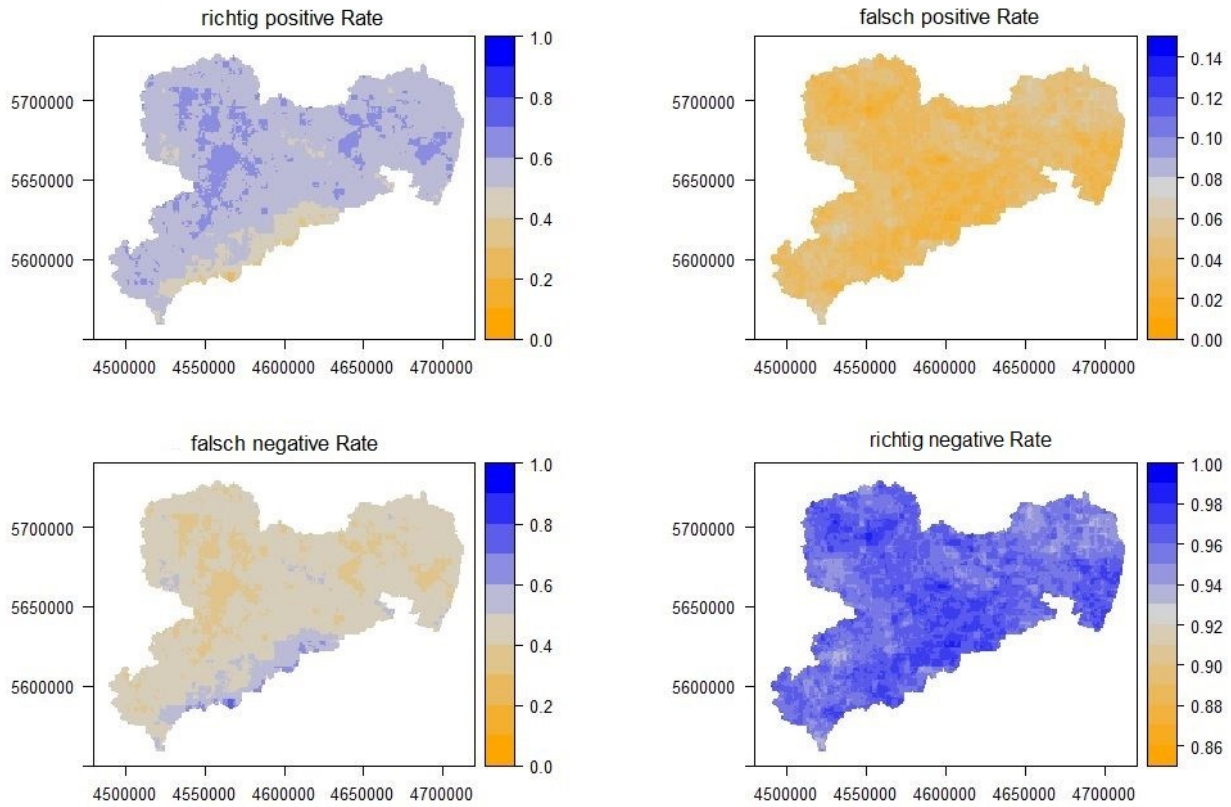


Abbildung 42: Bewertungsmaße für die Abbildung von Trockenheit im Oberboden (SMIOber<0,3)

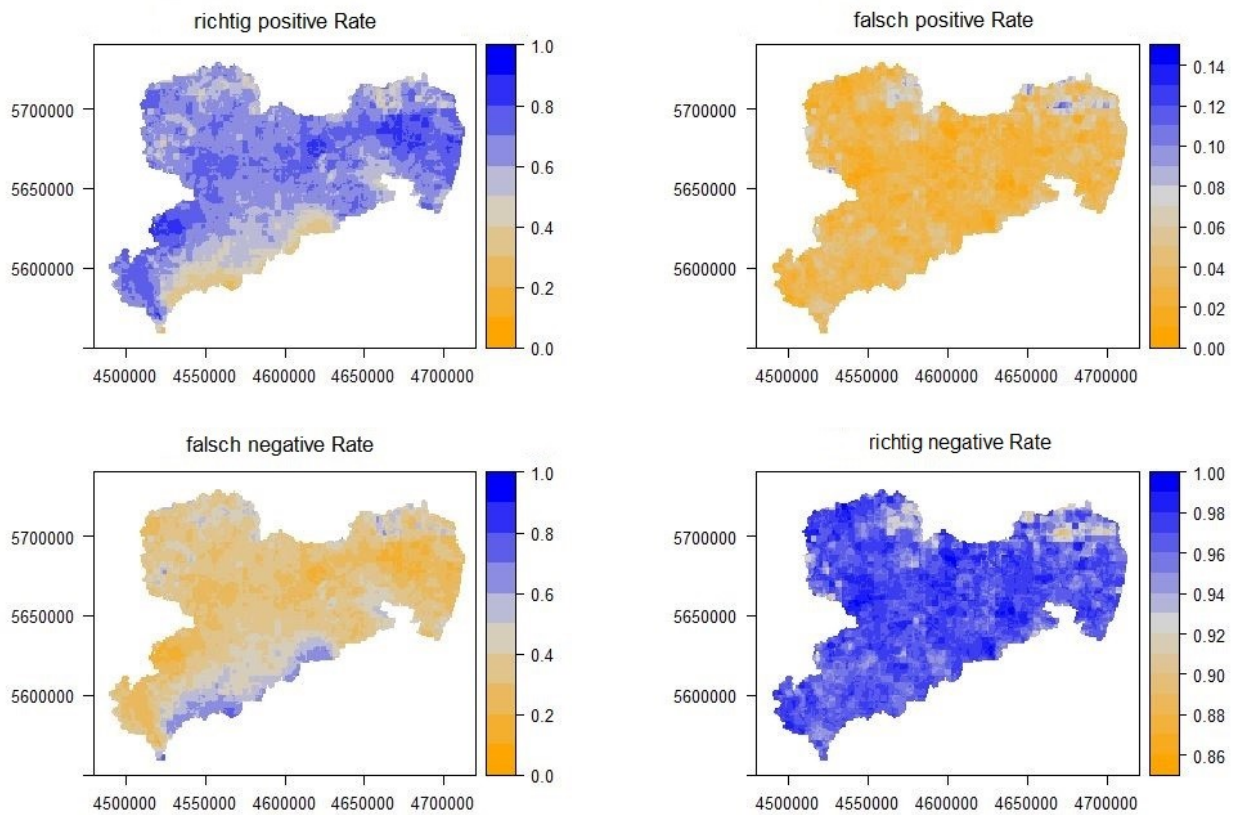


Abbildung 43: Bewertungsmaße für die Abbildung von Trockenheit im Gesamtboden (SMIGes<0,3)

Mit den MLR-Modellen (drei meteorologische Kennwerte als Prädiktoren für SMI_{Ober} und fünf für SMI_{Ges}) wurde der SMI pixelweise berechnet. Hieraus und aus den originalen SMI-Werten (vom Dürremonitor, als Vergleichswert) wurden die mittlere Andauer von Trockenperioden (SMI-Werte < 0,3) und die Intensität (Ausmaß = Summe der Werte unter SMI < 0,3; Intensität=Ausmaß/Andauer) berechnet. Als Maß für die Übereinstimmung zwischen den Modell- und den Vergleichswerten wurde die Kling-Gupta-Effizienz berechnet (Gupta et al. 2009), dessen Werte von $-\infty$ bis 1 reichen, wobei 1 eine vollständige Übereinstimmung aufzeigt (Abbildung 44).

Die Andauer wird für den Gesamtboden in weiten Regionen Sachsen gut wiedergegeben (>0,60), in den oberen Lagen der Mittelgebirge und einigen trockenen Regionen im Tief- und Hügelland (Südraum Leipzig und einigen nördlichen Regionen) wird die Andauer weniger gut getroffen. Im Oberboden zeichnet sich ein sehr heterogenes Bild der Andauer-Performance. Regionen mit guter Performance im Oberboden werden weniger gut als im Gesamtboden wiedergegeben und umgekehrt. Gebirgige Regionen performieren prinzipiell schlechter.

Bei der Wiedergabe der Intensität stellt sich ein anders Bild dar; für den Gesamtboden werden für den Großteil des Landes relativ geringe KGE-Werte erreicht, für den Oberboden relativ hohe Werte. Regionen mit geringer Performance sind der Nordosten, Leipziger Land und die höheren Gebirgsregionen

Die Festlegung auf einheitliche Prädiktoren (drei für SMI_{Ober} bzw. fünf für SMI_{Ges}) ist ein Kompromiss für das gesamte Land. Einige Regionen werden aufgrund ihrer naturräumlichen Charakteristika engere Relationen zu anderen Prädiktoren haben, was ein Grund für die Heterogenität der Modellperformance ist.

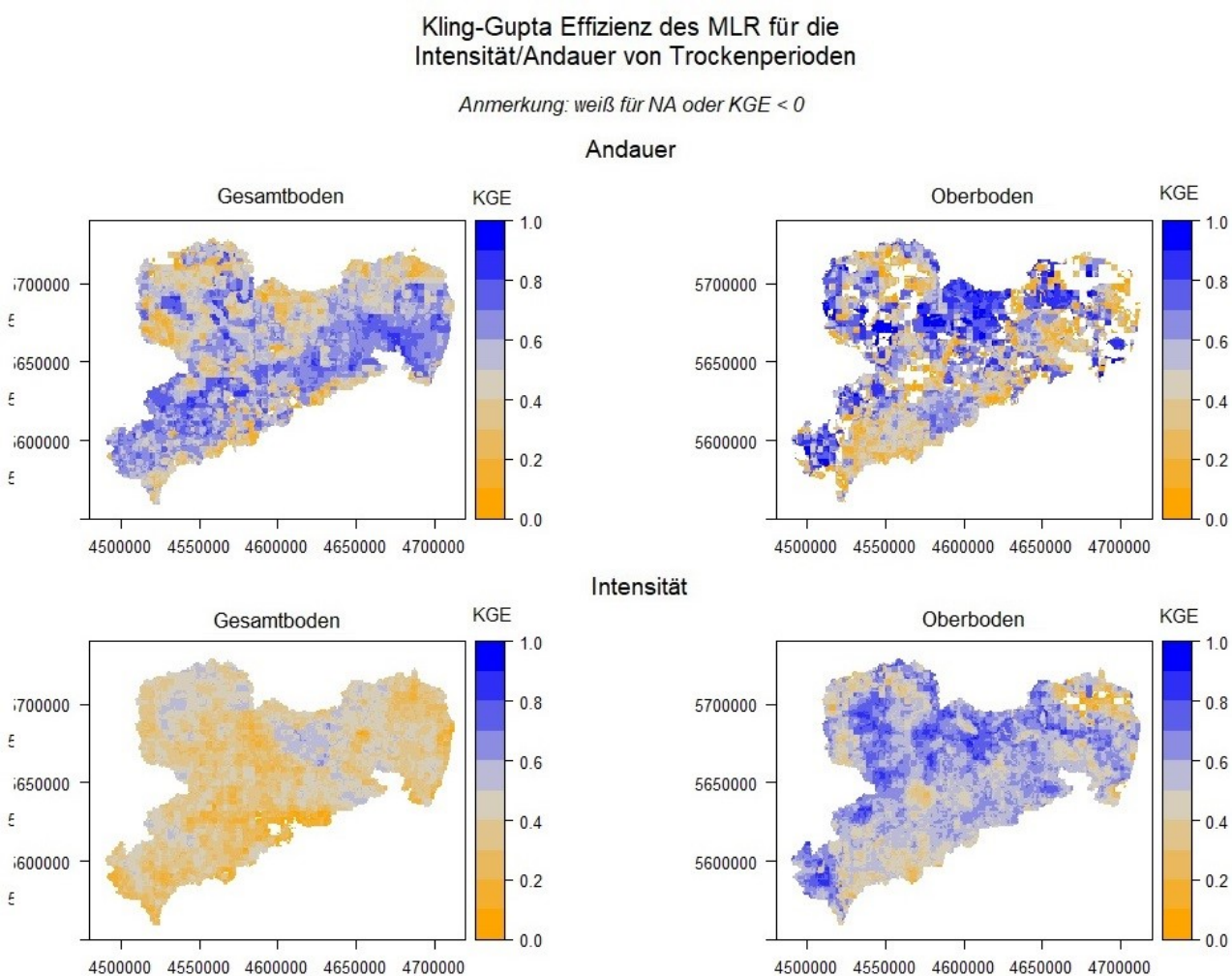


Abbildung 44: Kling-Gupta-Effizienz des MLR-Modells im Vergleich zu den SMI-Werten des Dürremonitors für die Abbildung der Andauer und Intensität von Trockenperioden

Inwieweit die erstellten MLR-Modelle die zeitliche Abfolge von Dürreereignissen in Sachsen abbilden können, verdeutlichen Abbildung 45 und Abbildung 46. Die drei Teile der Abbildung bedeuten im Einzelnen:

Im oberen Teil werden alle Rasterzellen ausgewertet, unabhängig davon ob sie eine Trockenheit anzeigen oder nicht ($SMI < 0,3$). Zellen mit $SMI > 0,3$ weisen eine Dürreintensität von Null auf. Dieser Ansatz wurde auch für eine ähnliche Darstellung der sachsenweiten SPI bzw. SPEI-Werte verwendet (Abbildung 14)

- Im mittleren Teil werden lediglich Rasterzellen ausgewertet, die eine Trockenheit anzeigen ($SMI < 0,3$). Zellen mit $SMI > 0,3$ werden nicht betrachtet. Mindestens 10% der Fläche Sachsen müssen eine Trockenheit anzeigen. Hiermit werden Dürreereignisse analysiert, die auch kleinräumig sein können.
- Wie mittlerer Teil, jedoch müssen mindestens 50% der Fläche Sachsen eine Trockenheit anzeigen. Hiermit werden lediglich großräumige Dürreereignisse analysiert.
- Ein Hinweis zur Farbgebung: Alle mittleren Dürreintensitäten mit Werten kleiner als 0,005 wurden weiß eingefärbt, um Trocken- und Feuchtephasen abgrenzen zu können. Andernfalls würde – insbesondere in der oberen Grafik – nur eine trockene Zelle in Sachsen schon zu einer Einfärbung führen.

Vergleich Dürreandauer und Intensität für den Gesamtboden

Oben: Dürremonitor; unten: Multiple Lineare Regression

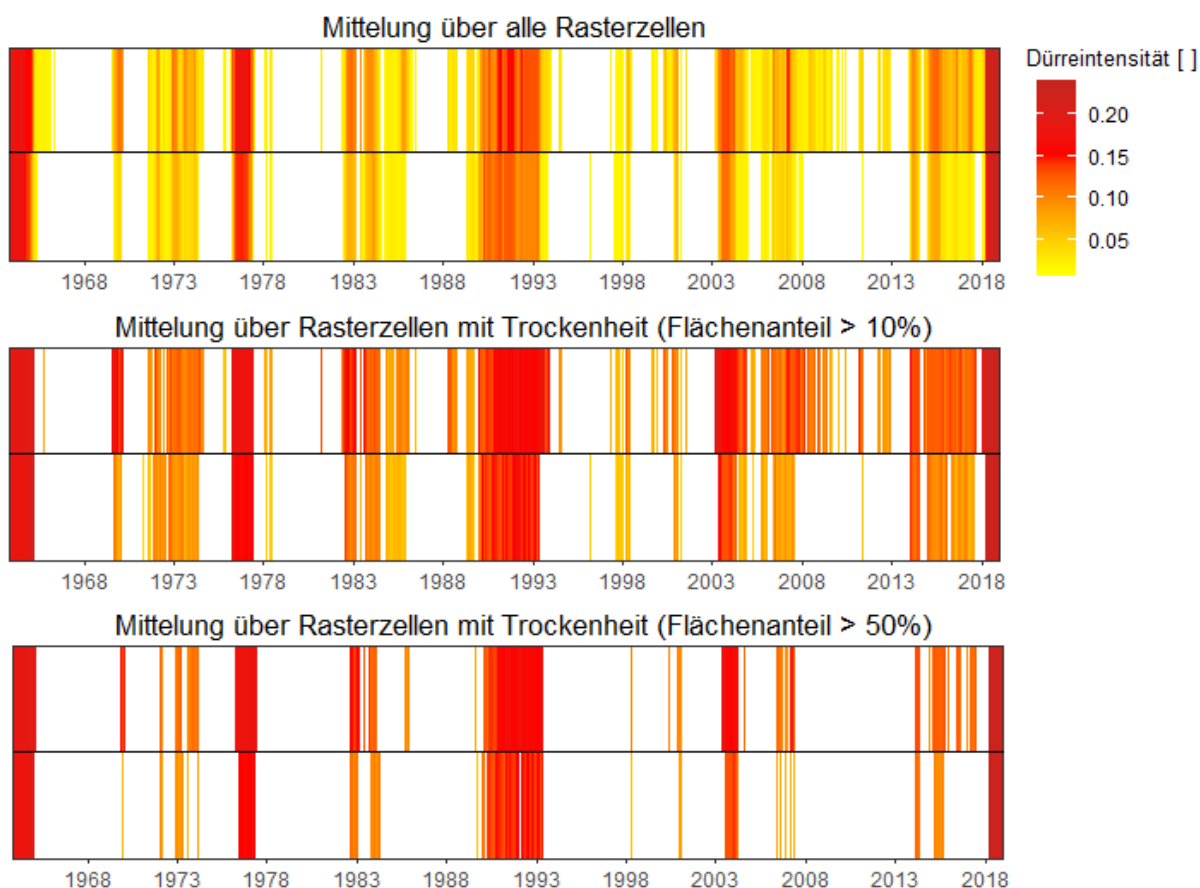


Abbildung 45: Vergleich von Dürreandauer und Intensität der modellierten SMI-Werte des Gesamtbodens (MLR) und der Werte des Dürremonitors für Sachsen (für Details zur Mittlung siehe Text)

Die Mittelung über alle Rasterzellen führt im Vergleich zu einer reinen Analyse der ‚trockenen‘ Rasterzellen zu längeren sachsenweiten Dürreperioden, da auch kleinräumige Trockenereignisse berücksichtigt werden. Nimmt man als Kriterium, dass mindestens 50% der Fläche Sachsens von Trockenheit betroffen sind, so werden nur starke Dürreperioden angezeigt und die Andauer ist kürzer.

Schwere und langanhaltende Ereignisse werden vom Modell für den Ober- und den Gesamtboden gut wiedergegeben. Auch die übrigen Dürreperioden weisen eine gute Übereinstimmung auf. In vielen Fällen werden Andauer und Intensität etwas unterschätzt (z.B. 2003–2008). Markanter fällt dies für den aktuellen Zeitraum ab 2015 im Oberboden bei Anwendung des 50% Flächenkriteriums auf. Kurze und weniger intensive Dürreperioden werden vom Modell in einigen Fällen nicht erfasst (z.B. Oberboden 1965–1970).

Vergleich Dürreandauer und Intensität für den Oberboden

Oben: Dürremonitor; unten: Multiple Lineare Regression

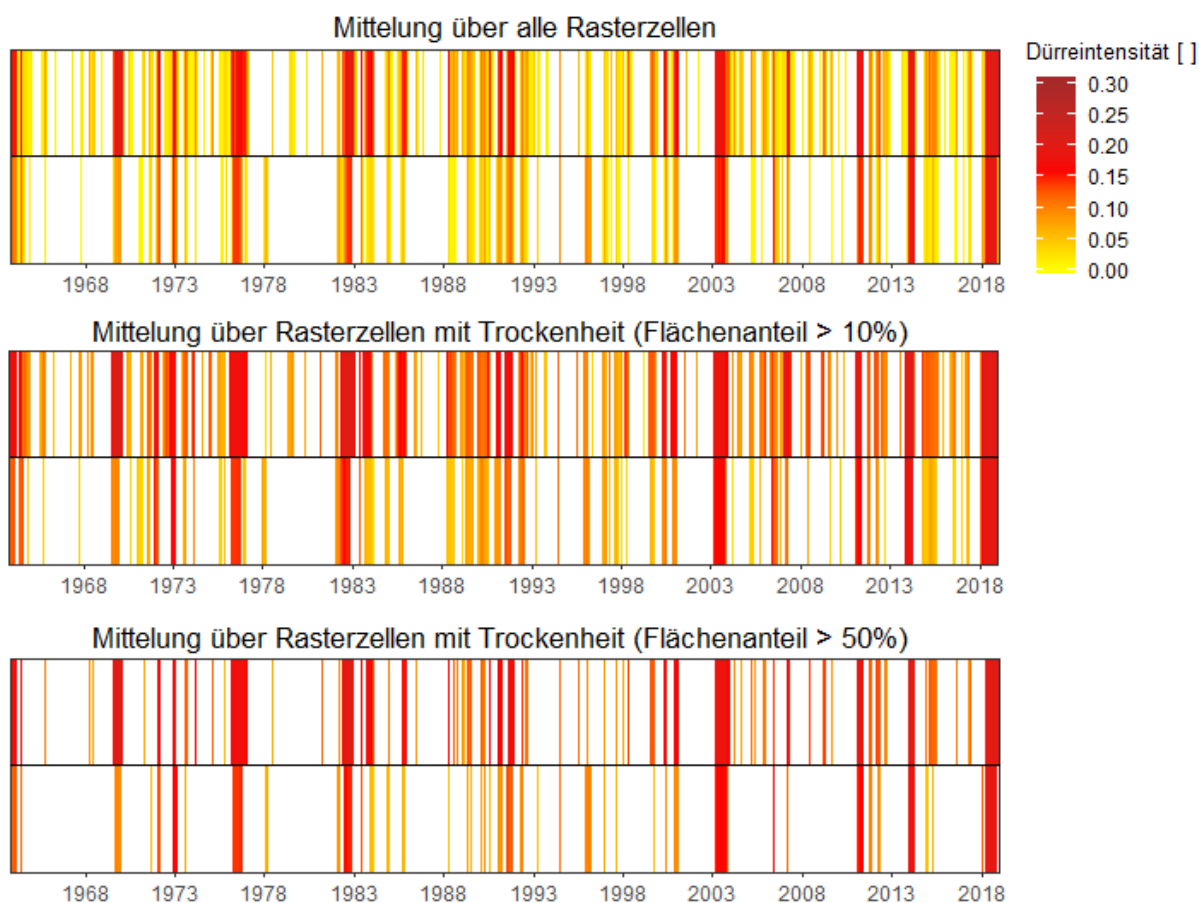


Abbildung 46: Vergleich von Dürreandauer und Intensität der modellierten SMI-Werte des Oberbodens (MLR) und der Werte des Dürremonitors für Sachsen (für Details zur Mittelung siehe Text)

Als objektives Maß der zeitlichen Analyse der drei Mittelungsansätze (vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46) wurden einige statistischen Kennzahlen berechnet (Tabelle 13). Die Gegenüberstellung der Maße für die MLR mit den (hier als Referenz betrachteten) Daten des Dürremonitors zeigen eine gute Übereinstimmung an. Für Sachsen gelingt es im Mittel demnach gut, die Häufigkeit, Andauer und Intensität von Trockenperioden mit einem Modell – welches auf verschiedenen Aggregierungsstufen des SPEI beruht – abzubilden. Größere Differenzen treten nur bei maximalen Andauern auf. Diese sind jedoch darauf zurückzuführen, dass die im Dürremonitor berechnete lange Trockenperiode um 1990 (41 Monate) durch zwei kürzere Trockenperioden, die durch einen feuchten Monat voneinander getrennt sind, abgebildet werden (Abbildung 45 unten).

Tabelle 13: Statistische Kennzahlen der zeitlichen Analyse der drei Mittelungsansätze (vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46) für den Gesamt- und den Oberboden: Mittlere Häufigkeit von Trockenperioden pro Jahr, mittlere und maximale Andauer und Intensität von Trockenperioden sowie die Kling-Gupta-Effizienz (KGE) zwischen dem Modell (MLR) und dem Dürremonitor (DM)

Mittelungsansatz	Alle Rasterzellen				10% Flächenanteil				50% Flächenanteil			
	SMI _{Ges}		SMI _{Ober}		SMI _{Ges}		SMI _{Ober}		SMI _{Ges}		SMI _{Ober}	
Statistisches Maß	DM	MLR	DM	MLR	DM	MLR	DM	MLR	DM	MLR	DM	MLR
Mittlere Häufigkeit	7	5	6	4	6	5	6	4	3	2	3	2
Mittlere Andauer	11	11	5	4	7	8	4	3	6	5	2	2
Maximale Andauer	55	54	21	11	48	42	13	11	41	22	12	10
KGE der Andauer	0.49		0.37		0.53		0.34		0.58		0.39	
Mittlere Intensität	0.11	0.11	0.13	0.11	0.13	0.11	0.12	0.09	0.15	0.13	0.15	0.11
Maximale Intensität	0.23	0.23	0.21	0.19	0.23	0.24	0.21	0.20	0.24	0.24	0.21	0.19
KGE der Intensität	0.74		0.48		0.7		0.46		0.74		0.47	

Zusammenfassend: Der SPEI ist die Variable mit dem größten Erklärungswert für die Trockenverhältnisse in Sachsen. Der SMI wird als beste Referenz angesehen, um zu entscheiden ob trockene oder normale Verhältnisse herrschen. Es wurden MLR-Modelle zur Erklärung des SMI mit verschiedenen SPEI-Aggregierungsstufen als Einflussgrößen erstellt. Für den Gesamtboden kann anhand der SPEI-Werte relativ sicher entschieden werden, ob es zu Bodentrockenheit kommt oder nicht. Hinsichtlich der Andauer und Intensität zeigen die Modelle in einigen Regionen gute Übereinstimmung. Generell werden höhere Lagen nur ungenügend wiedergegeben. Für den Oberboden ist eine Modellierung der Bodentrockenheiten prinzipiell etwas ungewisser.

5.5 Einfluss von Starkniederschlag auf Trockenheitsindizes

Ansatz 1: Analyse von Beobachtungsdaten

Die Prozesse der Infiltration des Niederschlags werden hauptsächlich von den Bedingungen im Oberboden bestimmt, weshalb diese im Folgenden detailliert analysiert werden. Die monatlichen SMI-Werte werden mit den SPI bzw. SPEI Werten verschiedener Aggregierungszeiten dargestellt (exemplarisch für Plauen in Abbildung 47). Die Punktgröße visualisiert den Anteil von Starkniederschlag⁵ an der Niederschlagssumme der gewählten Aggregierungszeit. Die Farben zeigen die Jahreszeit an.

Die stärksten Zusammenhänge ergeben sich zwischen SMI_{Ober} und SPI2 bzw. SPEI 2. Die Korrelationen zum SPEI sind hierbei stärker, was die Bedeutung der Verdunstung im Wasserhaushalt des Bodens verdeutlicht. Würde man nur die Abhängigkeit des SMI_{Ober} vom Niederschlag (SPI) und dessen Starkniederschlagsanteil betrachten, so verbliebe die Unsicherheit, wie die Verdunstung die Bodenfeuchte beeinflusst. Ein hoher SPI-Wert mit einem hohen Starkniederschlagsanteil kann aus zwei Gründen zu einer geringen Bodenfeuchte führen:

1. Eine hohe Verdunstung sorgt – trotz hohem Niederschlag – für eine geringe Bodenfeuchte
2. Ist die Verdunstung gering, muss tatsächlich wenig infiltriert und demzufolge viel oberflächlich abgefließen sein.

Starkniederschläge kommen gehäuft im Sommerhalbjahr als konvektive Ereignisse vor. Das ist gleichzeitig die Zeit relevanter Verdunstungshöhen. Betrachtet man in Abbildung 47 die Zusammenhänge zwischen SMI_{Ober} und SPI2 bzw. SPEI2, so fallen bei Bedingungen von Bodentrockenheit (SMI<0,3) größere Punkte im SPI2-Plot auf, die im SPEI2-Plot nach links „gewandert“ sind. Das sind Ereignisse, bei denen neben dem starken Niederschlag auch eine starke Verdunstung zu geringen Bodenfeuchten geführt haben. Zur eindeutigen Identifikation von Ereignissen, an denen die Infiltrationskapazität des Bodens überschritten wird und überschüssiges Wasser schnell abfließt, ist demzufolge der SPEI zu verwenden.

⁵ Als Schwelle wurde das 95. Perzentil des Niederschlags an der jeweiligen Station verwendet.

Eine vergleichende Betrachtung des Zusammenhangs zwischen SPEI2 und dem SMI_{Ober} für die sechs untersuchten Stationen (Abbildung 48) zeigt:

- Ereignisse mit hohem Starkniederschlagsanteil (große Punkte) kommen gehäuft unter normalen bis feuchten Bedingungen vor ($SMI > 0,5$) und verteilen sich um die lineare Ausgleichsgerade, bzw. liegen etwas darüber. Jedoch fällt auf, dass mit der linearen Regression keine gute Anpassung an die Daten gelingt.
- Unter trockenen Bedingungen ($SMI < 0,5$) gruppieren sich die Punkte deutlich rechts der Ausgleichsgerade. Zu Zeiten von Bodentrockenheit scheinen – in Chemnitz beispielsweise – Monate mit geringem Starkniederschlagsanteil weiter links zu liegen als Monate mit hohem Starkniederschlagsanteil (SPI hoch, aber SMI gering).
- Auf dem Fichtelberg fallen bei trockenem Boden viele winterliche Starkregenereignisse auf (blau), die zu einem hohen SPEI2 führen. Die Niederschläge akkumulieren sich in der Schneedecke und führen nicht zu einer Auffeuchtung des Bodens in diesem Monat (der SMI bleibt niedrig).

Zur Überprüfung, ob eine Gruppierung der Punkte entsprechend der Starkniederschlagsanteile existiert, wurden in Abbildung 49 Ausgleichskurven (ermittelt mit LOESS, locally weighted scatterplot smoothing) für drei verschiedene Gruppen von Starkniederschlagsanteilen geplottet. Die Unterschiede zwischen den Kurven sind zu Zeiten von Bodentrockenheit ($SMI < 0,3$) meist sehr gering und bestätigen nicht die oben geäußerte Vermutung, dass sich Monate mit geringem Starkniederschlagsanteilen weiter links im Plot befinden als diejenigen mit hohen Starkniederschlagsanteilen. Das bedeutet, dass keine prinzipiellen Abhängigkeiten der Bodenfeuchtigkeit von der Menge an Starkniederschlag erkennbar sind.

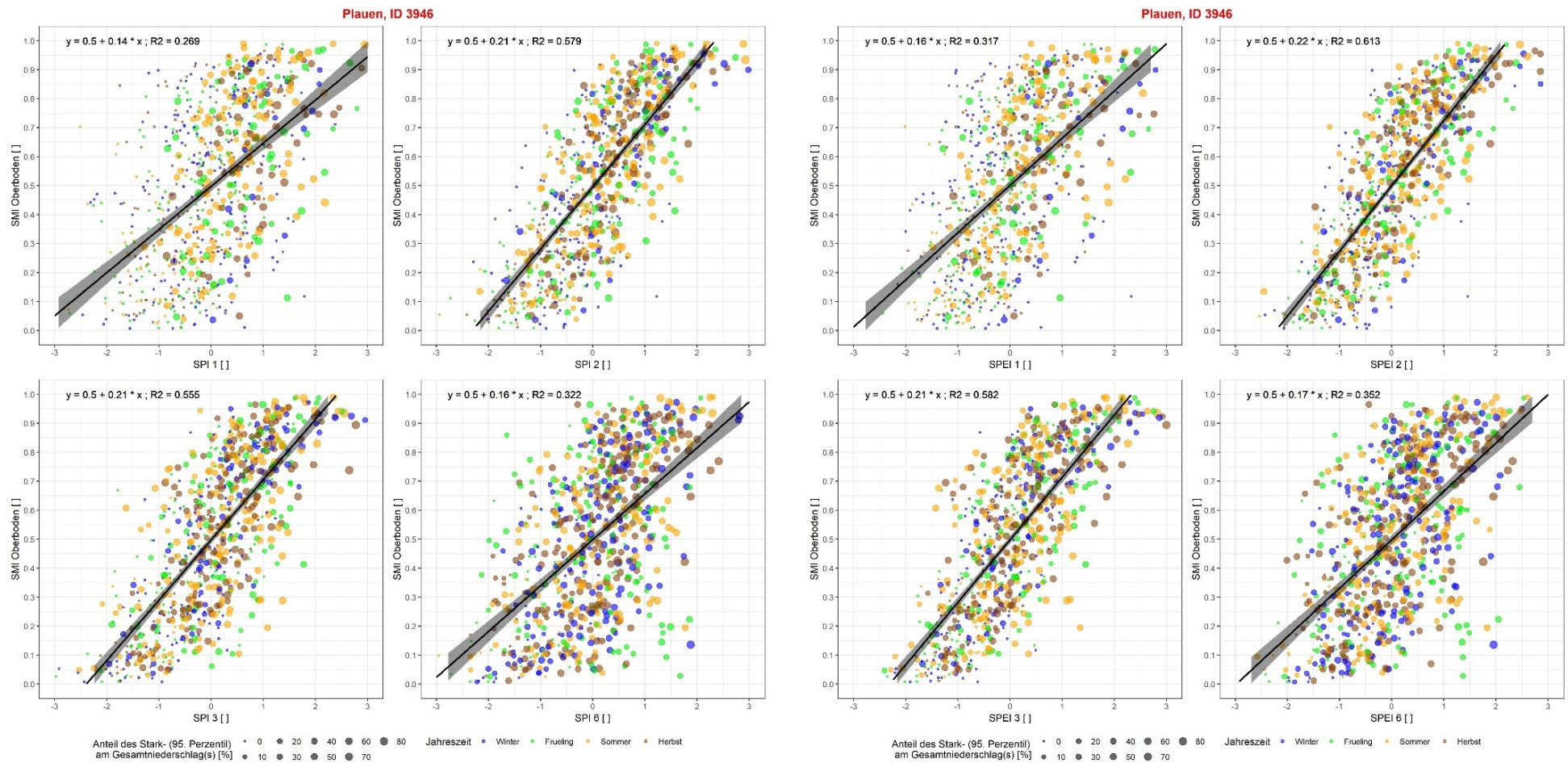
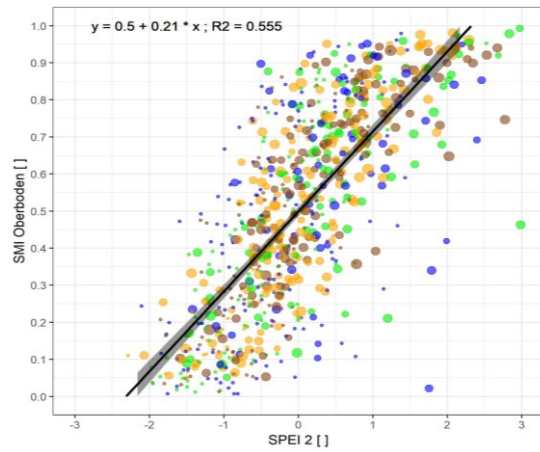
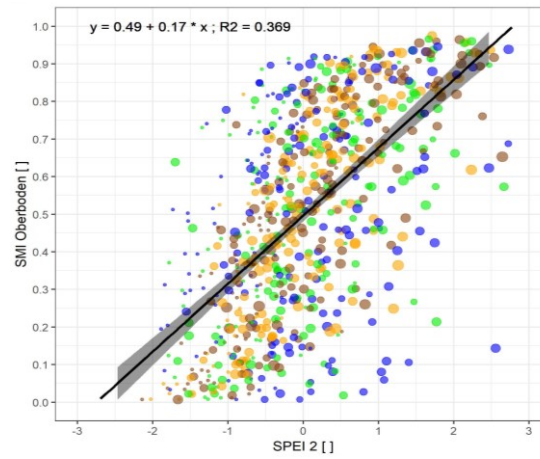


Abbildung 47: Zusammenhang von SPI und SPEI verschiedener zeitlicher Aggregationen mit SMI-Oberboden für die Station Plauen unter Berücksichtigung des Starkniederschlagsanteils (95. Perzentil) am Gesamtniederschlag. In grau eingezeichnet ist die lineare Ausgleichsgerade aller Punkte.

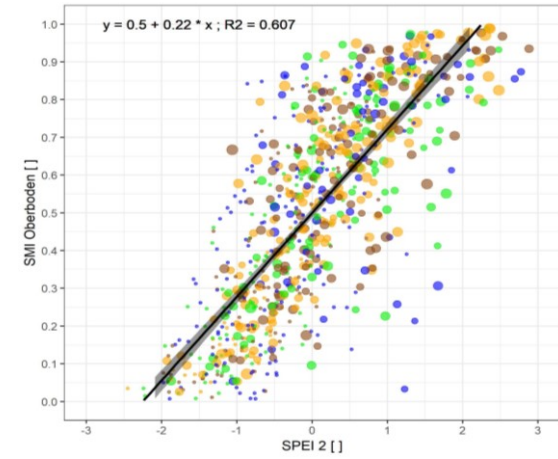
Dresden



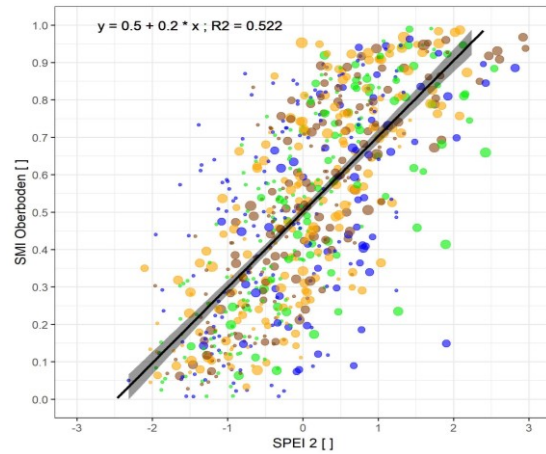
Fichtelberg



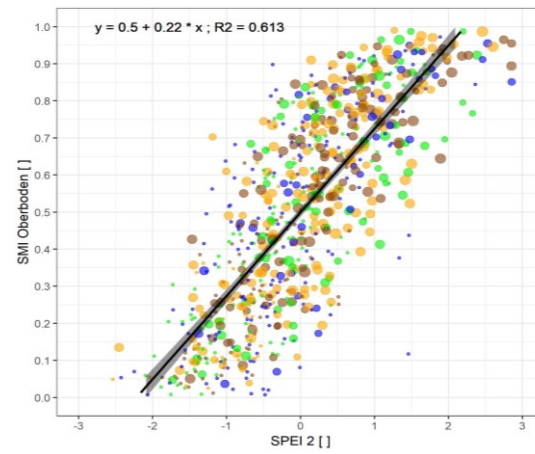
Görlitz



Leipzig



Plauen



Chemnitz

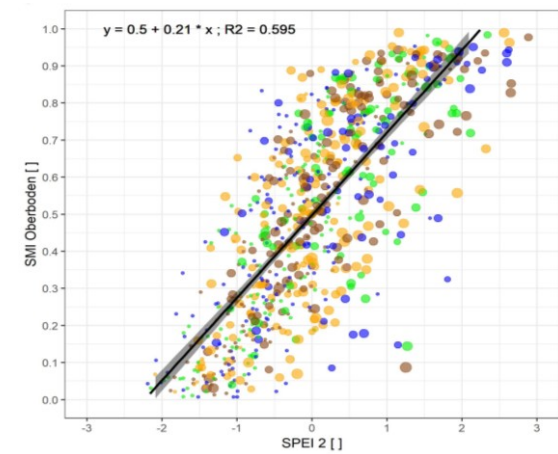


Abbildung 48: Zusammenhang zwischen SPEI2 und dem SMI-Oberboden für sechs Stationen (Details siehe Abbildung 47)

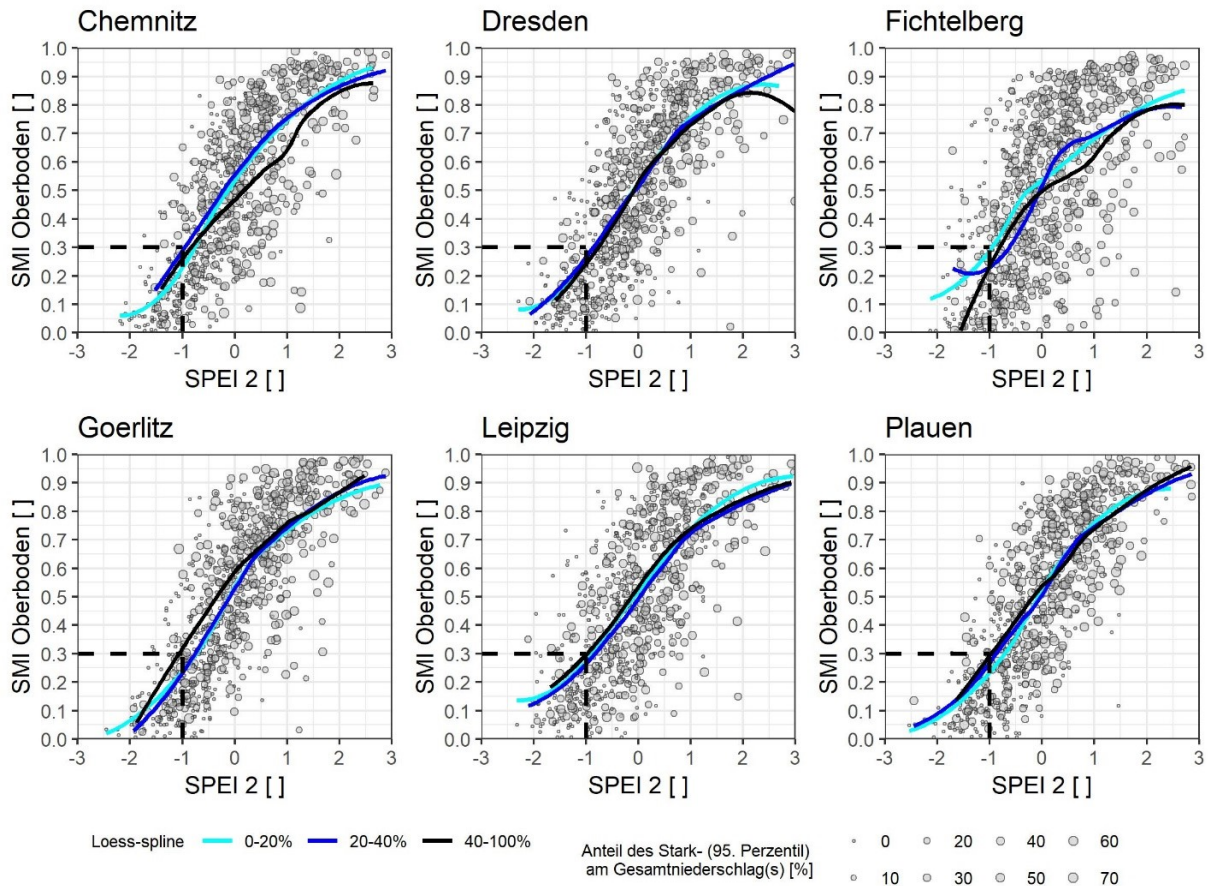


Abbildung 49: Zusammenhang zwischen SPEI2 und dem SMI-Oberboden für sechs Stationen, unter Berücksichtigung des Starkniederschlagsanteils (95. Perzentil) am Gesamtniederschlag. In hellblau eingezeichnet ist eine mit dem Verfahren LOESS (locally weighted scatterplot smoothing) ermittelte Ausgleichsgerade der Punkte mit einem Starkniederschlagsanteil von 0-20%. Ausgleichsgeraden in dunkleren Farbtönen stehen für höhere Starkniederschlagsanteile.

Eine alternative Visualisierung ist Abbildung 50 zu entnehmen. Exemplarisch für drei Stationen wurden lineare Ausgleichsgeraden für drei Klassen des Anteils vom Stark- am Gesamtniederschlag ermittelt (0–20%, 20–40%, 40–100%). Leicht zu erkennen ist, dass, je höher der Starkniederschlagsanteil ist, desto geringer ist der Anstieg der Ausgleichsgeraden. Für eine nähere Interpretation werden zwei Zustände betrachtet:

- Unter feuchten Verhältnissen (SPEI = 1; roter Pfeil) stellt sich bei geringen Starkniederschlagsanteilen (links) eine hohe Bodenfeuchtigkeit ein. Bei höheren Starkniederschlagsanteilen (rechts) stellt sich eine geringere Bodenfeuchtigkeit ein. Dies erscheint plausibel; die Infiltrationskapazität des Bodens wird bei Starkniederschlägen überschritten.
- Unter trockenen Verhältnissen (SPEI = -1; grüner Pfeil) stellt sich bei geringen Starkniederschlagsanteilen eine geringe Bodenfeuchtigkeit ein. Bei höheren Starkniederschlagsanteilen stellt sich eine höhere Bodenfeuchtigkeit ein, offensichtlich kann der Niederschlag komplett versickern.

Der vermutete Effekt, dass bei Starkniederschlägen unter Trockenbedingungen nicht das gesamte Wasser versickern kann, ist nicht mit diesen Daten zu belegen.

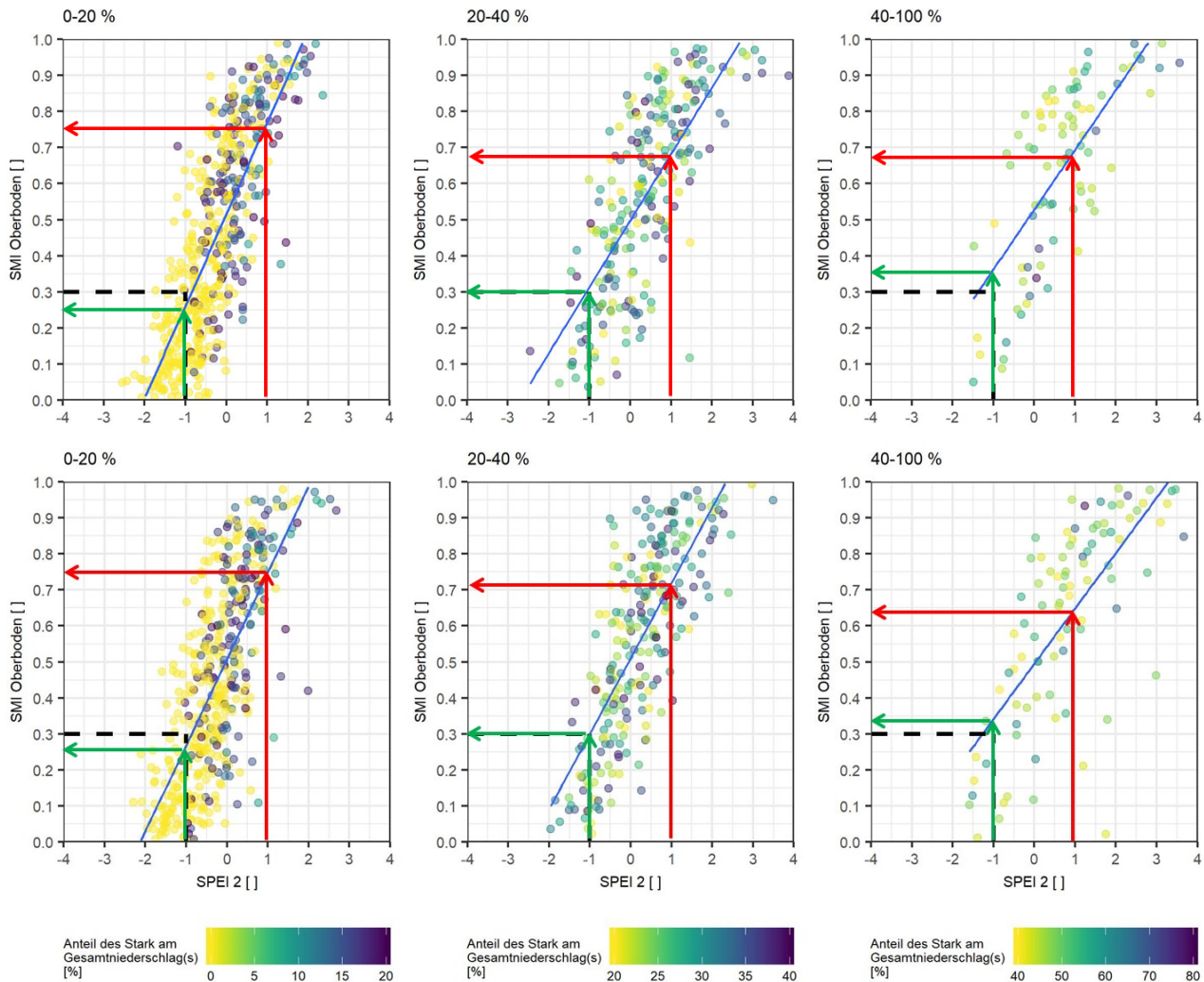


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen SPEI2 und dem SMI-Oberboden für Plauen (oben) und Dresden (unten), unter Berücksichtigung des Starkniederschlagsanteils (95. Perzentil) am Gesamtniederschlag des Monats. Links: Zusammenhang bei einem Starkniederschlagsanteil von 0-20%, Mitte von 20-40% und Rechts 40-100%. In Blau sind linearen Ausgleichsgeraden eingezeichnet. Zur Erklärung der Grünen und roten Pfeile siehe Text.

Dass es Ereignisse gibt, bei denen es unter Trockenbedingungen zu einer verminderten Versickerung kommt, verdeutlicht Abbildung 51. Der Juni 1996 wies im Raum Chemnitz einen hohen Starkniederschlagsanteil auf (60%; zwei hohe Tagessummen von 42 mm und 34 mm/Tag). Das bewirkte einen Anstieg im SPI und SPEI von trocken zu feuchten Bedingungen. Der SMI im Gesamt- und Oberboden verringern sich, zeigen demzufolge eine verstärkte Trockenheit an. Der Methodik des Bodenfeuchteindex geschuldet ist das Problem, dass der SMI monatsweise Anomalien anzeigt. Eine Verringerung des SMI ist demzufolge nicht automatisch gleich zu setzen mit einer realen Verschärfung der Bodentrockenheit. Hierzu wäre es nötig, die absoluten Werte der Bodenfeuchtigkeit in ihrem zeitlichen Verlauf zu analysieren (siehe nachfolgenden Ansatz).

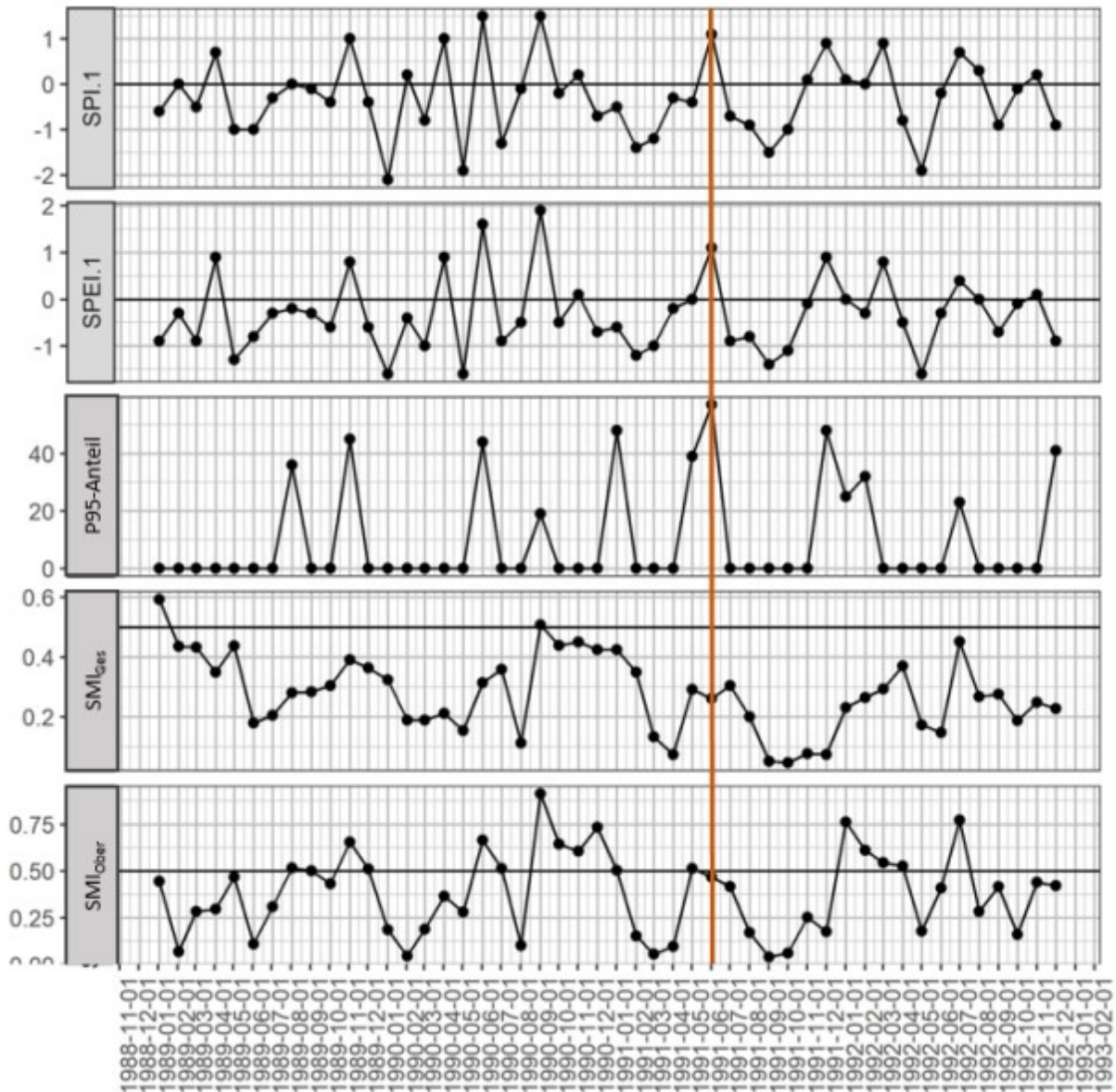


Abbildung 51: Vergleich von SPI und SPEI mit dem Bodenfeuchteindex des Ober- und Gesamtbodens für Chemnitz, unter Berücksichtigung des Starkniederschlagsanteils (Schwellwert ist das 95. Perzentil des Monats). Details zur vertikalen braunen Linie im Text.

Ansatz 2: Modellierung mit Brook90

Um die Wasserflüsse in täglicher Auflösung analysieren und somit den Wechselwirkungen zwischen Trockenheit und Starkniederschlägen nachgehen zu können, wurde das Standortwasserhaushaltsmodell „Brook90 for R“⁶ für drei exemplarische Einzugsgebiete angewendet (Zeitraum 1951–2018):

- Teil-EZG des Borsbergbaches (1,7 km²) bei Dresden,
- Teil-EZG der Würschnitz (11,0 km²) bei Chemnitz und
- Teil-EZG der Parthe (2,6 km²) bei Leipzig.

⁶ Brook90 for R (KRONENBERG & OEHLISCHLÄGEL 2019) ist eine für die Programmierumgebung R umgeschriebene Version von Brook 90 (FEDERER 2002). Es ist ein hydrologisches Modell, welches die Prozesse der Verdunstung und des Wassertransportes im Boden prozessbasiert modelliert.

Aus dem modellierten Bodenwassergehalt wurde mit einem vereinfachten Ansatz (empirische Quantile) der SMI berechnet. Der Fokus liegt auf der Analyse zwischen Starkniederschlag und Trockenheit, daher wurde der Wert von $SMI = 0,3$ als Schwelle zwischen trockenen und feuchten Episoden festgelegt (in Anlehnung an den Deutschen Dürremonitor).

Es wurden Niederschlagsereignisse analysiert, wobei ein Ereignis ab 1 mm pro Tag beginnt, und das Ereignis bei einer Tagessumme von weniger als 1 mm pro Tag unterbrochen wird.

Zur Analyse der Beziehungen zwischen Niederschlag und Bodenbefeuchtung wurden die Zunahmen des Bodenwassergehaltes innerhalb der Ereignisse quantifiziert. Basierend auf täglichen Niederschlagswerten wurde mittels der monatsweise festgelegten 95. Perzentile definiert, ob es sich um einen Stark- oder ein normales Niederschlagsereignis handelt. Wurde, beispielsweise, an einem Tag innerhalb eines Niederschlagsereignisses das 95. Perzentil des betreffenden Monats überschritten, so handelt es sich um ein Starkniederschlagsereignis. In Abbildung 52 ist für ein Teilzugsgebiet der Würschnitz (bei Chemnitz) die Beziehung zwischen ereignisbasiertem Niederschlag und modellierter Zunahme des Bodenwassergehaltes unter Trockenbedingungen ($SMI < 0,3$) dargestellt. Die Ereignisse werden farbig entsprechend ihrer Andauer und durch Symbole bezüglich des Niederschlagstyps klassifiziert. Die nachfolgende Nummerierung dient der Interpretation der Abbildung 52:

1. Normale Niederschlagsereignisse geringer Andauer und Ereignissumme (gelbe und hellgrüne Punkte) liegen sehr dicht an der Ausgleichsgeraden, d.h. nahezu der gesamte Niederschlag infiltriert in den Boden.
2. Dauern solche Ereignisse länger an (grüne, blaue Punkte), so kann nur noch ein Teil des Niederschlags infiltrieren.
3. Starkniederschlagsereignisse mittlerer und hoher Ereignissummen und langer Andauer (grüne und blaue Dreiecke) liegen meist weit entfernt von der Ausgleichsgeraden, d.h. die Infiltrationskapazität des Bodens ist überschritten.
4. Eben solche Ereignisse können auch 100%-ig versickern.
5. Fälle, in denen eine größere Summe in den Boden infiltriert ist als es während dieses Ereignisses geregnet hat (links der Ausgleichsgerade), sind auf Schneeschmelze zurückzuführen, die zu einem zusätzlichen Input von Wasser führen.

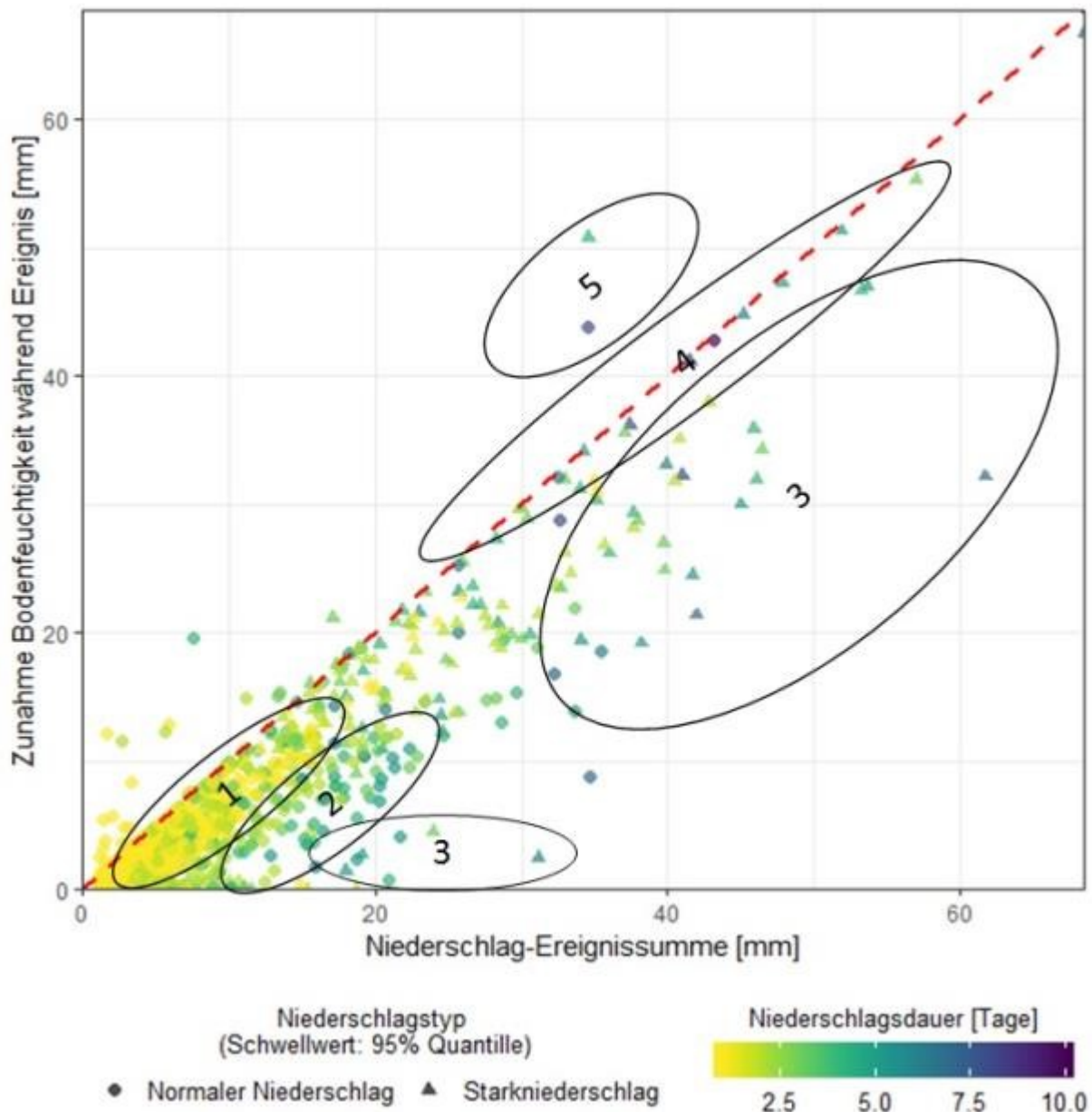


Abbildung 52: Beziehung zwischen ereignisbasiertem Niederschlag und modellierter Zunahme des Bodenwassergehaltes für ein Teileinzugsgebiet der Würschnitz (bei Chemnitz) unter Trockenbedingungen (SMI<0,31); siehe Text zur Interpretation der nummerierten Ellipsen.

Die Ergebnisse validieren ansatzweise die postulierte verminderte Versickerung bei Starkregen während einer Trockenperiode. Mit Brook90 konnten zwar eine Reihe solcher Ereignisse identifiziert werden; die Analyse erfolgte jedoch ohne Berücksichtigung die Vorfeuchte des Bodens, um die Komplexität der Analyse zu reduzieren. Das erschwert jedoch die Interpretation. Ob ein Starkniederschlag unter Trockenbedingungen zu einer starken Versickerung führt oder ein gewisser Teil oberflächlich abfließt hängt natürlich in entscheidendem Maße von der Vorfeuchte ab.

Die durchgeführten Analysen erlauben noch nicht, die summarischen, niederschlags- und verdunstungsbezogenen Trockenheitsindizes (Monatsbasis) dergestalt zu modifizieren, dass die Intensität des Niederschlags berücksichtigt wird. Ob ein solcher Zusammenhang überhaupt generell abgeleitet werden kann, oder ob die Standorteigenschaften (Boden, Geologie, Landnutzung, Relief) dies nicht zulassen, müsste in detaillierten Studien untersucht werden.

5.6 Darstellung der Ergebnisse

Dem Thema „Starkregen“ wurde in den letzten Jahren größere Beachtung geschenkt als der Trockenheit. Gründe sind vermutlich die unmittelbaren Auswirkungen eines Starkniederschlags, wie wild abfließendes Wasser, Hochwasser, Erosion, Hangrutschungen etc. Dagegen kommen die Auswirkungen von Trockenheit meist schleichend daher und sind mit Witterungen verbunden, die für viele Menschen eher positiv besetzt sind (warme und trockene Sommer). Die heißen und trockenen Phasen der Jahre 2018 und 2019 und ihre enormen Auswirkungen auf viele sozioökonomische Bereiche haben in den Medien viel Beachtung gefunden und das Thema auf die politische Agenda geholt.

Als ein Beitrag zu einer weiteren Sensibilisierung der breiten Öffentlichkeit für das Thema „Trockenheit“ werden die Ergebnisse der Trockenprojekte der letzten Jahre aufgearbeitet und in einer leicht verständlichen Präsentation bereitgestellt (siehe DVD).

Des Weiteren erfolgt eine Visualisierung der wichtigsten Karten des Berichtes in ReKIS (www.rekis.org). Das Layout und Ablage der Karten erfolgte in einem REKIS-Viewer kompatiblen Format; es wurden Grid-ASCII und KML Dateien erstellt, damit eine nutzerspezifische räumliche Auswahl der Themen in ReKIS erfolgen kann.

6 Konzept zur Erfassung und Analyse von Trockenheitssituationen

Aufbauend auf Erkenntnissen der Dürreforschung der letzten Jahre in Sachsen wird im Folgenden ein umsetzungsfähiges Konzept zur Erfassung und Analyse von bisherigen und möglichen zukünftigen Änderungen im Auftreten von Trockenheitssituationen vorgestellt. Eine Anwendung dieses Konzepts auf eine neue klimatologische Datengrundlage ist vorgesehen. Das sind zum einen zwei beobachtete, unabhängige 30-jährige Klimanormalperioden (1961–1990 und 1991–2020) und zum anderen die aktuellen Klimaprojektionen für den Zeitraum 1961 bis 2100. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung bzw. Fortschreibung von Anpassungsstrategien im Klimafolgenbereich in Sachsen geleistet.

Die Basis des Konzepts bilden Atmosphärenparameter, deren Verfügbarkeit sowohl in langfristigen Beobachtungen als auch in langfristigen Klimaprojektionen gegeben ist. Wurden in HÄNSEL et al. (2016) auch operationelle Aspekte des Dürremonitorings beleuchtet, verfolgt das hier vorgelegte Konzept einen rein klimatologischen Betrachtungsansatz, analysiert also die atmosphärischen Bedingungen, die eine Ausbildung von Trockenheitssituationen begünstigen.

Analysen zur Trockenheit wurden in der Vergangenheit sowohl stations- als auch flächenbasiert durchgeführt. Für eine stationsbasierte Analyse spricht die hohe Qualität der Datensätze. Vorteil eines flächenhaften Ansatzes ist die große räumliche Differenzierung der Ergebnisse, die jedoch mit einer erhöhten Unsicherheit durch die bei der Interpolation unvermeidlich auftretenden Fehler einhergeht. Um Aussagen für weniger gut meteorologisch beobachtete Regionen zu ermöglichen, sollte eine sachsenweite Berechnung von Trockenkennwerten mittels flächenhafter Daten erfolgen.

6.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage für die Trockenheitsanalysen muss ein konsistent verfügbares Elementspektrum für die Beobachtungen und die Klimaprojektionen vorliegen. Unter diesem Aspekt wurden die Trockenheitskennwerte ausgewählt. In Tabelle 14 wurden die derzeitigen besten Datensätze der Vergangenheit und der Zukunft für Sachsen zusammengestellt.

Der Klima-Referenzdatensatz wurde 2017 für Stationen aus Sachsen und der näheren Umgebung für den Zeitraum 1951 bis 2015 erstellt (PLUNTKE et al. 2017). Hierzu wurden die beobachteten Klimadaten des DWD sowie der Tschechischen und Polnischen Wetterdienste plausibilitätsgeprüft, korrigiert und lückengefüllt. Die Regionalisierung der Klimainformationen auf ein 1 x 1 km Gitter erfolgte durch das Tool RaKliDa (BERNHOFER et al. 2009). Jede Gitterzelle kann nun als Pseudostation interpretiert und deren Zeitreihe analysiert werden. Nach Abschluss des Messjahres 2020 sollte eine aktuelle Version des Klima-Referenzdatensatzes erstellt werden. Gegebenenfalls können die Daten durch Messungen aus den Sächsischen Landesmessnetzen ergänzt werden.

Aus den Projekten EURO-CORDEX⁷ und ReKliEs-De⁸ liegen Klimaprojektionen mit einer räumlichen Auflösung von ca. 12.5 km vor. Diese wurden vom DWD in Zusammenarbeit mit weiteren Institutionen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit geprüft⁹. Folgende Modelle wurden von den Modellentwicklern zurückgezogen:

- PIK-STAR3 für das RCP8.5-Szenario: Erzeugte statistische Zusammenhänge der Vergangenheit können für die stark veränderten Klimazustände der Zukunft ab etwa 2060 nicht mehr als gültig angesehen werden.
- CNRM-CERFACS-CNRM-CM5(r1): Eingangsdaten des globalen Klimamodells CNRM-CM5 stammen von verschiedenen Läufen. Damit ist die Tag-zu-Tag-Zuordnung einiger Variablen nicht korrekt. Diese Problematik betrifft nur die nicht bodennahen Eingangsdaten, die jedoch in dynamischen Regionalmodellen eingehen.

⁷ Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (<https://euro-cordex.net/>)

⁸ Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (<http://reklies.hlnug.de/home.html>)

⁹ https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtsl_rcp-datensatz_node.html

- DMI-HIRHAM5: Simulationen enthalten keine zeitliche Änderung der Treibhausgaskonzentrationen.
- CEC-WETTREG2013: Die Empirisch-Statistische Downscaling-Methode WETTREG erstellt Ergebnisdatensätze für Stationen. Auf Grund von Nutzeranforderungen wurden die Daten auf das EURO-CORDEX-Gitter übertragen. Bei der Interpolation sind für die Variablen Sonnenscheindauer und Luftdruck Probleme aufgetreten, die bisher noch nicht gelöst wurden.

Tabelle 14: Elementspektrum, dessen Verfügbarkeit und Qualität in verschiedenen Datensätzen

Klimaelement	Klima-Referenzdatensatz (stations- und flächenbasiert)	WMSax2.0 (stationsbasiert)	ReKliEs-De (flächenbasiert)
Niederschlag (korrigiert)	-vorhanden	-unkorrigiert vorhanden	-für dynamische Modelle vorhanden -für statistische Modelle unkorrigiert vorhanden
Lufttemperatur (mittel)	-vorhanden	-vorhanden	-vorhanden
Lufttemperatur (min)	-vorhanden	-vorhanden	-vorhanden
Lufttemperatur (max)	-vorhanden	-vorhanden	-vorhanden
Globalstrahlung	-Sonnenscheindauer vorhanden* ¹	-Sonnenscheindauer vorhanden* ¹	-für dynamische Modelle vorhanden -für statistische Modelle Sonnenscheindauer vorhanden* ¹

*¹ Die Globalstrahlung ist mittels des Ångström-Ansatzes berechenbar.

Eine Übersicht über die Projektionen, die vom DWD als Referenz-Ensemble vorgeschlagen werden, gibt Abbildung 53. Die PIK-STARs Projektionen für das RCP2.6 könnten für die Berechnung von Trockenkennwerten genutzt werden, da lediglich Probleme mit dem Luftdruck auftreten. Für jedes RCP Szenario schlägt der DWD ein Kern-Ensemble v2018 mit einer vordefinierten Anzahl von Klimaprojektionen vor. Dabei sollen hinsichtlich der Lufttemperatur mindestens 90 und hinsichtlich der restlichen Parameter mindestens 80% der Bandbreite des Klimasignals im Referenz-Ensemble erhalten sein. Weitere Änderungen des Kern-Ensembles im Jahr 2019 betreffen wahrscheinlich die Hinzunahme neuer EPISODES¹⁰-Simulationen und eventuell neu interpolierte Daten der statistischen Modelle CEC-WETTREG2013 und PIK-STARs.

Hinter WMSax2.0 verbergen sich speziell für Sachsen erstellte statistische Klimaprojektionen (SPEKAT und ENKE, 2018). Sie beinhalten 130 WEREX VI Projektionen (5 Modelle, 3 RCP Szenarios (nicht alle Kombinationen), jeweils 10 Realisierungen), welche auf die Modellierung des mittleren Klimaverhaltens abzielen. Eine zusätzliche Fokussierung auf Extreme war mit einer weiter entwickelten Version des KlaMuKo-Verfahrens (ENKE et al. 2016) anvisiert. Für den Niederschlag können Aussagen für 10 und für die anderen Größen für 3 (Klima-)Räume getätigt werden, räumlich differenziertere Aussagen sind mit diesem Ansatz nicht möglich. Die Strategie, Elemente von WEREX VI und KlaMuKo in einer Verfahrensvariante gemeinsam einzusetzen, führt zu schwer interpretierbaren Resultaten. Daher bieten sich für Trockenanalysen in Sachsen aus diesem Projekt lediglich die WEREX VI Datensätze an. Bei einem Plausibilitätstest der oberen und unteren Grenzen der Klimaelemente fiel auf, dass im Mi5r1R85-Lauf unplausible Minimumtemperaturen vorkommen (-154,1°C), weshalb dieser Datensatz vor einer Anwendung gesondert geprüft werden sollte. Der WEREX VI Datensatz liegt bisher noch nicht regionalisiert vor. Zu beachten ist, dass in der der Professur vorliegenden Version nur sächsische Stationen und keine Daten der Nachbar(bundes)länder enthalten sind. Für ein optimales Regionalisierungsergebnis an den Rändern Sachsens wären Daten der unmittelbaren Umgebung hilfreich.

¹⁰ Episodes ist eine Empirisch-Statistische Downscaling Methode des DWD (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/episodes/episodes.html?nn=541460>)

Liste der Klimaprojektionen				
GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E		x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	DMI-HIRHAM5			09.08.2018
NGG-NorESM1-M (r1)	DMI-HIRHAM5		09.08.2018	09.08.2018
ICHEC-EC-EARTH (r2)	DMI-HIRHAM5	09.08.2018	09.08.2018	09.08.2018
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	02.03.2018	02.03.2018	02.03.2018
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)	IPSL-INNERIS-WRF331F		19.06.2018	19.06.2018
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)	SMHI-RCA4		x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	SMHI-RCA4	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4	x	x	x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	SMHI-RCA4		02.03.2018	02.03.2018
CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17			x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17		x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x	x
MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x		x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom-CCLM4-8-17		02.03.2018	02.03.2018
ICHEC-EC-EARTH (r12)	GERICS-REMO2015			x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	GERICS-REMO2015			x
CCCma-CanESM2 (r1)	GERICS-REMO2015			x
MIROC-MIROC5 (r1)	GERICS-REMO2015			x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	GERICS-REMO2015			02.03.2018
ICHEC-EC-EARTH (r12)	UHOH-WRF381H			x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	UHOH-WRF381H			x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF381H	x		x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	PIK-STAR33 (v1r1)	14.02.2019		14.02.2019
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	PIK-STAR33 (v1r1)	14.02.2019		14.02.2019
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	PIK-STAR33 (v1r1)	14.02.2019		14.02.2019
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	PIK-STAR33 (v1r1)			14.02.2019
CCCma-CanESM2 (r1)	PIK-STAR33 (v1r1)			14.02.2019
MIROC-MIROC5	PIK-STAR33 (v1r1)			14.02.2019
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	GEG-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
ICHEC-EC-EARTH (r12)	GEG-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	GEG-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
CCCma-CanESM2 (r1)	GEG-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
MIROC-MIROC5 (r1)	GEG-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	GEG-WettReg2013 (v1r1)	14.02.2019		14.02.2019
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	MPI-CSC-REMO2009	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009	x	x	x

CORDEX EUR11 Ensemble (blau),
ReKüEs-De Ensemble (grün).

Abbildung 53: DWD-Ensemble 2018 mit zurückgezogenen (durchgestrichen) und empfohlenen Klimaprojektionen

6.2 Trockenheitsmerkmale

In den sächsischen Trockenheitsstudien der vergangenen Jahre wurden international weit verbreitete und für das Dürremonitoring verwendete Trockenindizes auf deren Eignung für Sachsen untersucht. Der Standardisierte Niederschlagsindex (SPI) wird aufgrund seiner geringen Datenanforderungen (monatlicher Niederschlag), seiner einfachen Berechnung und seiner guten Relationen zu vielen sozioökonomischen Bereichen unseres Lebens am häufigsten verwendet. Die sich global und regional ändernden Klimabedingungen, insbesondere die steigenden Temperaturen, bewirken, dass die Verdunstung bei der Entstehung von Trockenperioden und deren Intensität zunehmend eine größere Rolle spielt. Der – dem SPI sehr ähnliche – Standardisierte Niederschlags-Verdunstungsindex (SPEI) wird in vielen Regionen der Erde bevorzugt eingesetzt, da häufig engere Zusammenhänge zu Impaktgrößen zu finden sind. Die Berechnung der potentiellen Verdunstung erfordert jedoch zusätzliche Klimadaten, wie Temperatur und gegebenenfalls Sonneneinstrahlung und Wind, deren Verfügbarkeit weltweit deutlich geringer ist als bei Niederschlägen. Die notwendige Regionalisierung dieser Klimadaten stellt unter Umständen eine bedeutende Unsicherheitsquelle dar. In Deutschland genügt die Stationsdichte, um sichere Regionalisierungen vorzunehmen. Der Reconnaissance-Dürreindex RDI nutzt das Verhältnis von Niederschlag und potentieller Verdunstung. In der hier vorliegenden Studie wiesen SPI und SPEI gegenüber dem RDI i.d.R. ein höheres Erklärungspotential für Dürreauswirkungen auf. Auch in Modellen mit multiplen Trockenkennwerten verfügte der RDI meist nicht über ein zusätzliches Erklärungspotential.

Für zukünftige Arbeiten wird empfohlen die atmosphärischen Trockenkennwerte SPI und SPEI zu verwenden. Aus einer vergleichenden Analyse beider Indizes können die Anteile von Niederschlag und Verdunstung an den Trockenperioden abgeleitet werden.

Innerhalb der Berechnungsprozedur müssen theoretische Verteilungsfunktionen an die Daten angepasst werden. Nach umfangreichen Tests wurden für den SPEI die Normalverteilung und für den SPI die Gammaverteilung festgelegt. Zu beachten ist, dass bei der Analyse von Projektionen, die Daten des modellierten Kontrolllaufs (meist 1961–2005) zur Ermittlung der Verteilungsparameter genutzt werden müssen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Referenzperioden sowie unterschiedlicher Ansätze der Berechnung der potentiellen Evapotranspiration auf die Ermittlung von Trockenphasen wurde untersucht. Es wurden der Referenzzeitraum 1961–2000 sowie der Turc-Wendling-Ansatz (DVWK 2002) ausgewählt.

Es wird definiert, dass eine Trockenperiode beginnt sobald der SPI (analog SPEI) den Wert 0 unterschreitet und bei erneutem Überschreiten des Wertes 0 endet. Mindestens einmal muss der SPI den Wert -1 in einer Trockenperiode unterschreiten. Zur spezifischen Betrachtung von starken bzw. extremen Trockenperioden wird der Zeitraum abgegrenzt, der dauerhaft Werte von -1,5 bzw. -2,0 unterschreitet. Zu einer umfassenden Charakterisierung von Trockenperioden sollten folgende Größen aus den Trockenkennwerten berechnet werden

- Auftretenshäufigkeit,
 - Andauer,
 - Ausmaß (positive Summe der SPI-Werte aller Monate innerhalb der Trockenperiode) und
 - Intensität (Quotient aus Ausmaß und Andauer).
- Die Anwendung sollte auf typische Aggregierungszeiträume von SPI und SPEI von 1, 3, 6, 12 und 24 Monaten erfolgen, um Auswirkungen auf Land- und Forstwirtschaft, Hydrologie und Grundwasser zu berücksichtigen. Um innerjährliche Veränderungen zu identifizieren und Aussagen für die relevanten Zeiträume der verschiedenen Bereiche zu generieren, sollten neben jährlichen Analysen die meteorologischen und hydrologischen Halbjahre (SHJ_M: Apr–Sept. und SHJ_H: Mai–Okt.), die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden I und II (VP I: April–Juni und VP II: Juli–September) betrachtet werden. Analysen von klimatologischen bzw. aktuellen Anomalien sollten stets auf die Referenzperiode 1961–1990 bezogen werden, z.B. 1991–2018 oder 2018 vs. 1961–1990.

Die Darstellung der Trockenanalyse sollte sowohl die zeitliche als auch die räumliche Variabilität umfassen. Beispielhaft sei das Jahr 2018 eingeordnet. In Abbildung 54 ist deutlich die Stärke und in Abbildung 55 das flächenhafte Ausmaß des außergewöhnlichen Trockenereignisses in 2018 auf allen Zeitskalen ersichtlich.

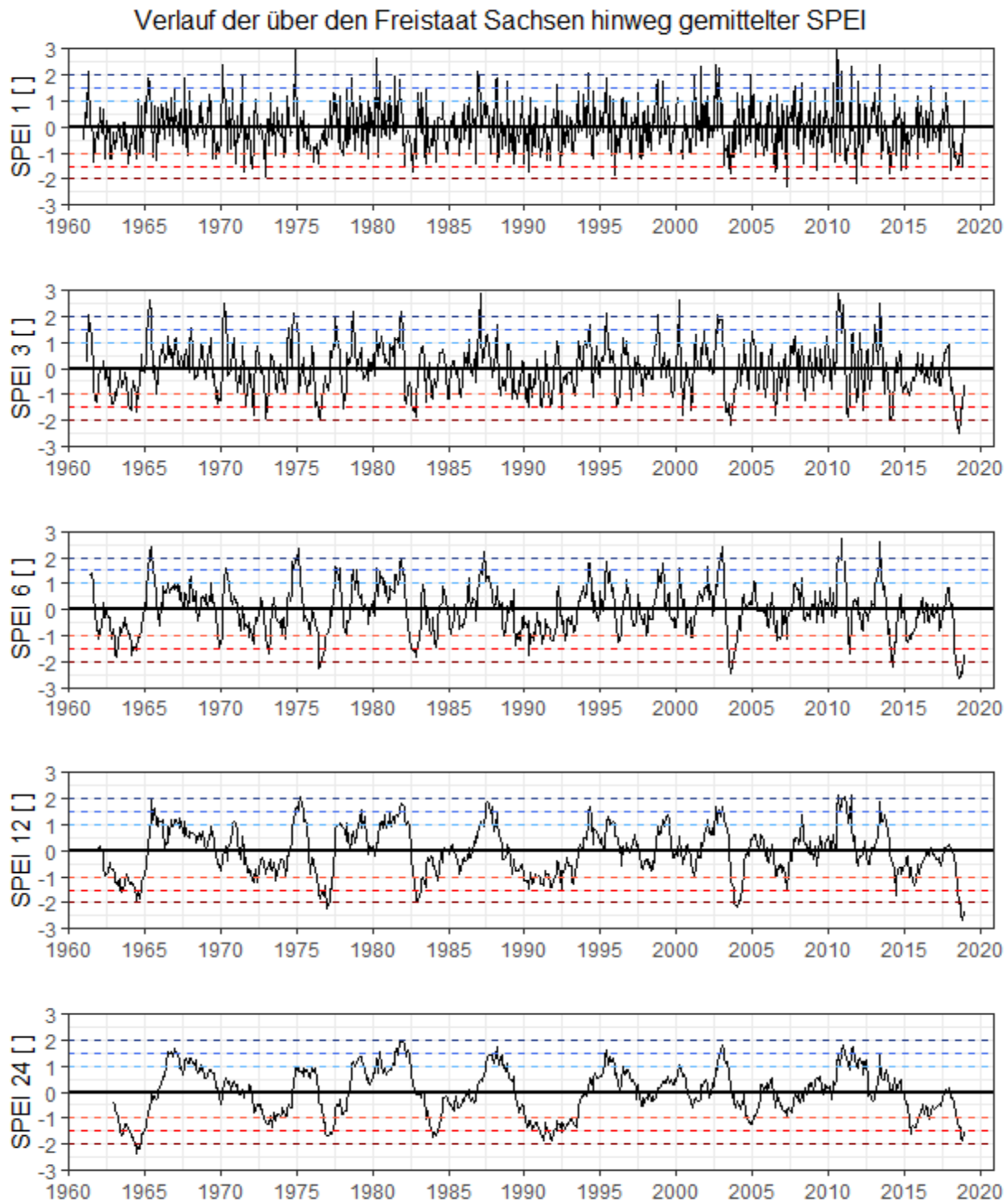


Abbildung 54: Zeitreihe des SPEI verschiedener Aggregierungsstufen, Sachsenmittel

Verlauf der von Trockenheit betroffenen Fläche in Sachsen gemäß SPEI

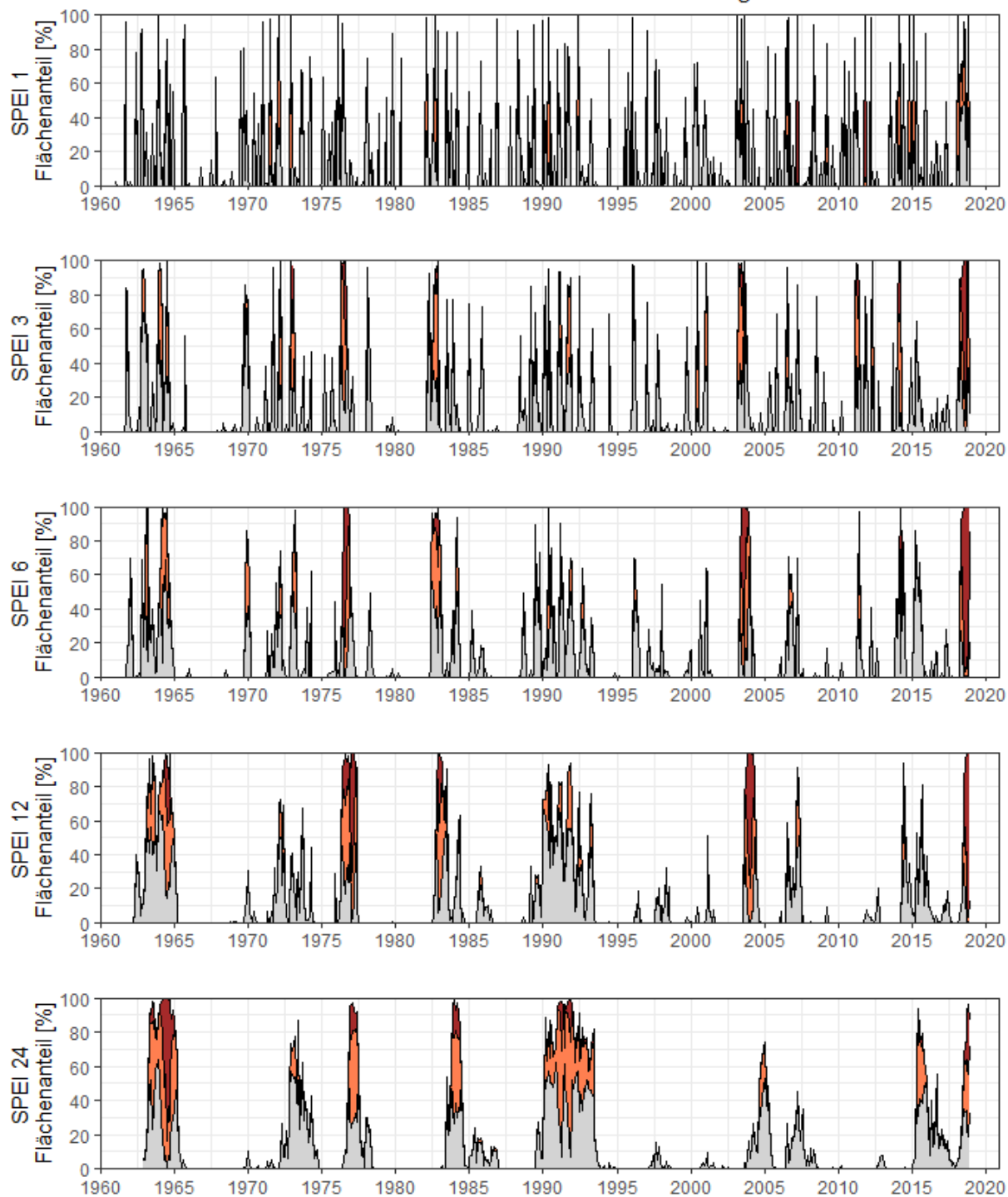


Abbildung 55: Zeitreihe der flächenhaften Ausprägung von SPEI Trockenperioden verschiedener Aggregierungsstufen und verschiedener Schweregrade, Sachsenmittel

Eine zusätzliche und für viele Anwender verständlichere Alternative für die Darstellung von Trockenperioden stellt die Visualisierung des kumulativen Defizits von Niederschlag, Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz dar. Die Angaben erfolgen in mm und sind so besser vorstellbar. Die zeitliche Abfolge des Defizits kann pro Station (Abbildung 56) dargestellt werden. Dabei können Referenzperioden (z.B. 1961–1990 und/oder 1991–2015) und weitere markante Trockenjahre wie 2003 zur Einordnung visualisiert werden. Regionalspezifische Analysen werden durch kartenhafte Darstellungen des flächenhaften Defizits zu einem Zeitpunkt (z.B. Dezember) ermöglicht.

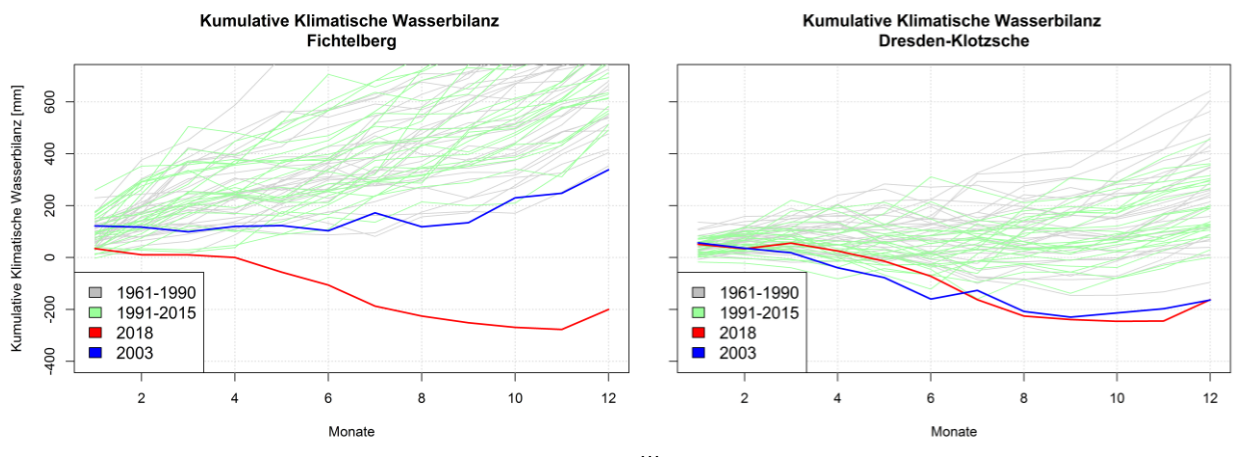
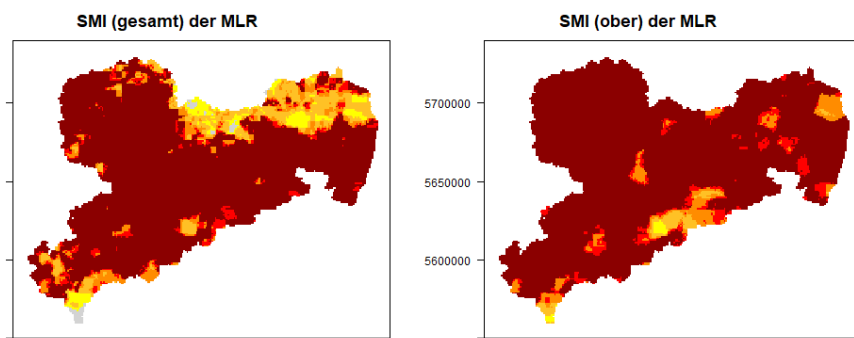
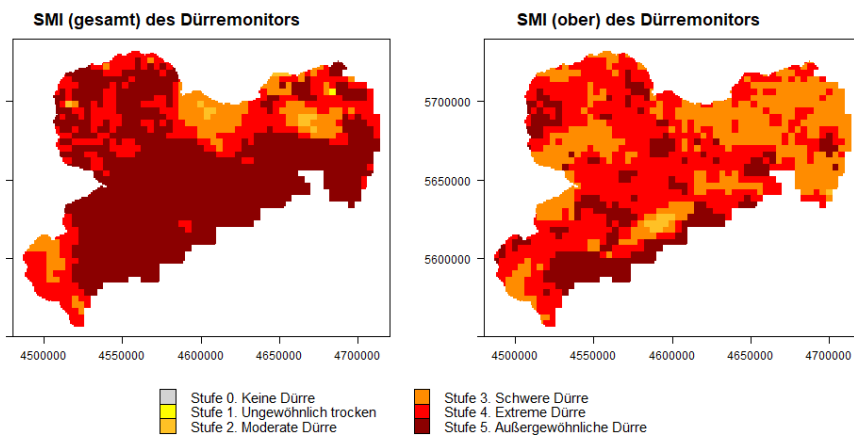


Abbildung 56: Kumulative Klimatische Wasserbilanz einzelner Trockenjahre (2003 und 2018) im Vergleich zu Jahren der Referenzperioden 1961–1990 und 1991–2015

Als noch stärker anwendungsorientiertes Maß für die Trockenheit wurde aus einer Kombination von atmosphärischen Trockenkennwerten mittels multipler linearer Regression der Bodenfeuchteindex für Ober- und Gesamtboden abgeleitet. Unter der Annahme, dass die Bodenfeuchte ein geeignetes Trockenmaß mit direkten Zusammenhängen zur Pflanzenvitalität und den hydrologischen Prozessen ist, kann die MLR genutzt werden, um aus meteorologischen Eingangswerten impaktrelevante Indizes abzuleiten: in diesem Fall den Bodenfeuchteindex des Ober- und des Gesamtbodens. Die Koeffizienten und der R-code sind im digitalen Anhang abgespeichert (im Verzeichnis ‚Regressionsmodell_SPEI_SMI‘).

In Abbildung 57 wird dies anhand des Jahres 2018 exemplarisch für zwei Monate dargestellt. Aus dem Vergleich der berechneten SMI-Werte mit denen des Dürremonitors wird die Güte ersichtlich; für den Gesamtboden ist eine recht gute Übereinstimmung ersichtlich, für den Oberboden offenbaren sich starke regionale Unterschiede.

August 2018



Oktober 2018

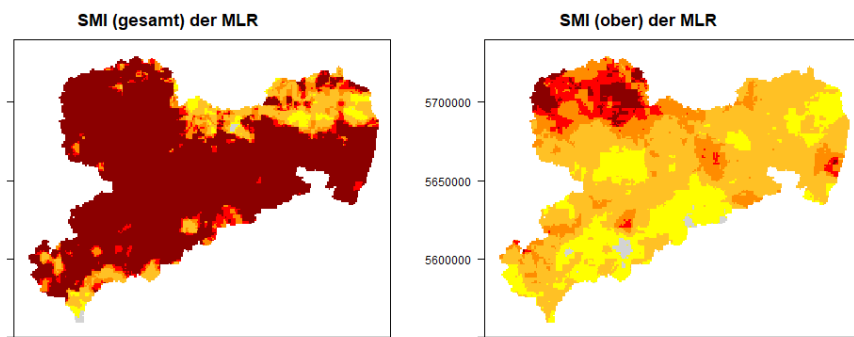
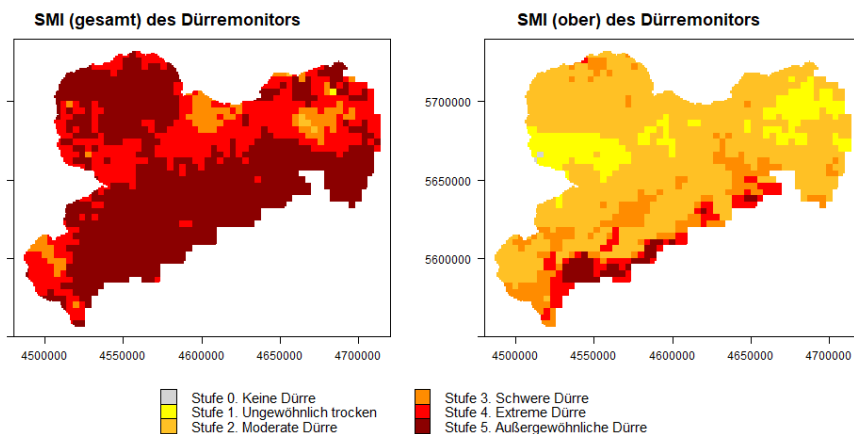


Abbildung 57: Bodenfeuchteindex SMI ermittelt mit einer Multiplen Linearen Regression MLR im Vergleich zu den Werten des Dürremonitors; Beispielhaft für zwei Monate des Jahres 2018, getrennt für Ober- und Gesamtboden

Eine Visualisierung der zeitlichen Abfolge der Intensität aufgetretener Bodendürren für Sachsen zeigt Abbildung 46 (oben). Die Ermittlung der Intensität erfolgt dabei analog zu den SPI-Berechnungen, wobei als Schwellwert für Beginn und Ende der Trockenperiode ein SMI-Wert von 0,3 verwendet wird. Diese Art der Abbildung ermöglicht eine Einordnung aktueller meteorologischer Bedingungen hinsichtlich Häufigkeit, Andauer und Intensität von Trockenperioden. Auch Aussagen zu zukünftigen Veränderungen meteorologischer und ansatzweise land- und forstwirtschaftlicher Trockenperioden sind somit unter Nutzung von Klimaprojektionen mit geringem Aufwand möglich.

Verschiedene Arten von Darstellungen bieten sich zur Analyse der Trockenkennwerte an:

1. Karten zur Darstellung der räumlichen Verteilung der Charakteristika von Trockenheiten, z. B. zur Gegenüberstellung aktueller Klimazeiträume mit der Referenzperiode (Beispiel: Abbildung 15)
2. Zeitreihendarstellung des SPI und SPEI verschiedener Wirkzeiträume (Beispiel: Abbildung 11) oder der flächenhaften Betroffenheit in Sachsen, z.B. zur Einordnung aktueller Witterungsverhältnisse
3. Zeitreihendarstellung des Auftretens von Trockenperioden zur Analyse von Häufigkeit, Andauer und Intensität, basierend auf SPI und SPEI verschiedener Wirkzeiträume sowie des SMI (Beispiel: Abbildung 14)
4. Zeitliche Abfolge von Subzeiträumen (z.B. Jahreszeiten) von 2. und 3. (Beispiel: Abbildung 18)
5. Berechnung mittlerer Trockencharakteristika (Häufigkeit, Andauer, Ausmaß und Intensität) basierend auf SPI bzw. SPEI und tabellarische Gegenüberstellung der Referenzperiode und aktueller Perioden

Im Folgenden werden für typische Analysegegenstände sinnvolle Indikatoren und Darstellungsformen empfohlen, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben:

■ Landwirtschaft:

- SPEI 3 und $SMI_{\text{Oberboden}}$ als Zeitreihendarstellung und als Karten für VP I, VP II oder das SHJ_M

■ Forstwirtschaft:

- Generell forstliche Wachstumsperiode relevant: Karten für den Augustwert des SPI 3 und für den Septemberwert des SPI 6
- Für Waldbrandanalysen: SPEI 3+6+12 als Zeitreihendarstellung und als Karten für den Frühling, Sommer und SHJ_M
- Für Schäden durch Trockenheit und Schädlingsbefall (Buchdrucker, Kupferstecher): Zeitreihendarstellung $SMI_{\text{Oberboden}}$ und SPEI 3+6 und Karten für SPI 3 für Frühling, Sommer und SHJ_M

■ Durchflüsse:

- Zeitreihendarstellungen SPEI 3+6 und Karten für alle Jahreszeiten und Halbjahre

■ Grundwasserstände:

- Zeitreihendarstellung SPEI 12+24 und Karten für alle Jahreszeiten, Halbjahre

■ Operationelle Aufgaben (z.B. Soforthilfen):

- Zeitreihendarstellungen von SPI und SPEI verschiedener Wirkzeiträume sowie des SMI für Ober- und Gesamtboden
- Karten aktueller Anomalien

■ Planungsaufgaben (z.B. Anpassung), Ökonomische Analysen:

- Zeitreihen des Auftretens von Trockenperioden
- Karten klimatologischer Anomalien
- Identifizierung des Anteils von Niederschlagsdefizit und erhöhter Verdunstung: mittels Differenzenplot (Beispiel Abbildung 12) oder tabellarische Gegenüberstellung mittlerer Häufigkeiten, Andauern und Intensitäten von Trockenperioden basierend auf SPI

7 Zusammenfassung

In der für die Wirkungszeitskalen 1, 3, 6, 9, 12 und 24 Monate vorgenommenen flächenhaften Analyse von Trockenheit für den Freistaat Sachsen zeigen sich starke Ähnlichkeiten in den identifizierten räumlichen Auftrittsmustern von Trockenheit für die Trockenheitsindizes SPI (standardisierter Niederschlag) und SPEI (standardisierte Wasserbilanz). Ab den 1990er Jahren führen die stark ansteigenden Lufttemperaturen und somit höheren Verdunstungsraten zu einem Auseinanderdriften der Indexwerte; so werden Trockenphasen mittels SPEI als schwerwiegender und die Nassphasen als weniger intensiv bewertet als mittels SPI. Im Rahmen der globalen Erwärmung wird der SPI somit für ein Trockenheitsmonitoring in unseren Breiten zunehmend ungeeignet. Das Auftreten von Trockenheit wurde zwar in der Vergangenheit in unserer Klimaregion größtenteils durch Variationen des Niederschlags bestimmt, mit der Klimaerwärmung nimmt jedoch der Einfluss weiterer Klimakenngrößen zu und erfordert die Verwendung komplexerer Dürreindizes. In Bezug auf die zeitlichen Veränderungen der Trockenheitsindizes bestätigen sich Ergebnisse bisheriger regionaler Untersuchungen mit einem Trend zu trockeneren Bedingungen im Frühjahr bzw. der ersten Vegetationsperiode sowie nasserem Bedingungen während des Sommers und der zweiten Vegetationsperiode (siehe Abbildung 58).

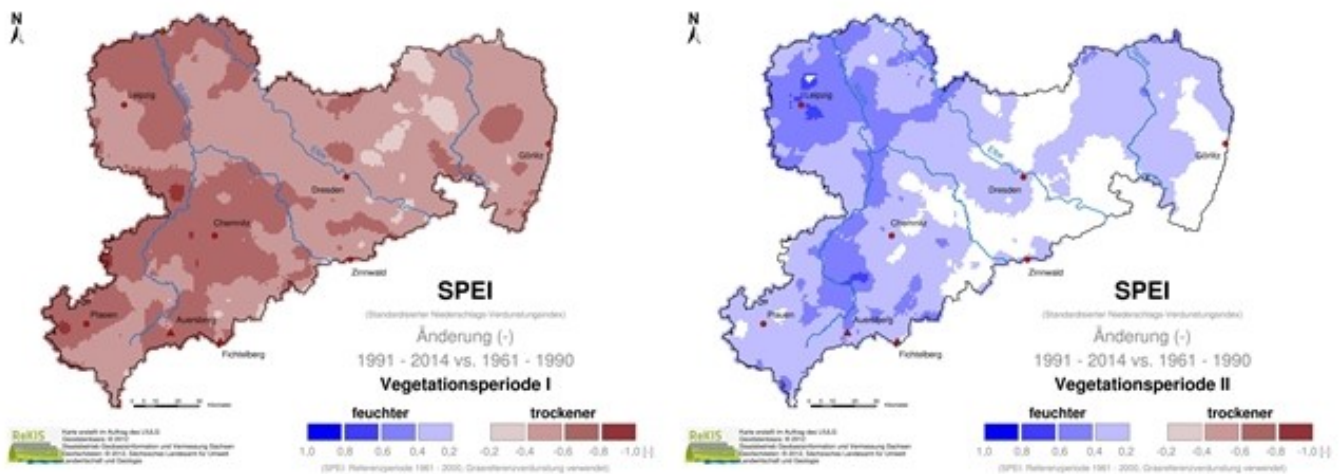


Abbildung 58: Zeitscheibenvergleich 1991–2014 vs. 1961–1990 für den SPEI für die VP I und II.

Die mittlere Dauer von Trockenperioden hat auf allen Zeitskalen abgenommen – insbesondere auf den langen Wirkungszeitskalen (Analysezeitraum 1961–2014). Starke Trockenphasen – vor allem auf den kurzen Zeitskalen – sind auch nach 1990 noch mehrfach aufgetreten.

Kongruent hierzu ist ein deutlicher Rückgang in der Intensität und der räumlichen Ausdehnung von Trockenperioden zu beobachten. Auch räumliche und jahreszeitliche Verschiebungen sind relevant. Während intensive Trockenheit im Zeitraum 1961–1990 im Südwesten Sachsens recht häufig auftrat, war dies im Zeitraum 1991–2014 im Nordosten der Fall.

Der Reconnaissance-Dürreindex RDI wurde bei den stationsweisen Trockenanalysen berücksichtigt. In den Korrelationsanalysen zeigten sich i.d.R. stärkere Zusammenhänge zu SPI und SPEI als zu RDI. Auch in multiplen Regressionsanalysen wies der RDI meist kein zusätzliches Erklärungspotential auf.

Anhand der durch die Fachbehörden bereitgestellten Impaktdaten wurden SPI und SPEI exemplarisch hinsichtlich ihrer Impaktrelevanz untersucht. Ziel ist die Identifikation der für den jeweiligen Fachbereich besonders sensitiven Wirkungszeitskalen sowie die Überprüfung relevanter Indexschwellenwerte.

Zusammenhänge zwischen den Trockenindizes und landwirtschaftlichen Ertragsdaten sind nur für einige Kulturen erkennbar. So reagiert die Sommergerste auf Trockenheit in der VP I mit Ernteeinbrüchen und Kartoffel- sowie Zuckerrübenenerträge auf Trockenheit in der VP II. Dass nicht mehr aussagekräftige Zusammenhänge aufgedeckt werden

konnten, ist zum einen auf die zu kurze Datenreihe zurückzuführen und zum anderen auf die starke Reduktion der gegebenen Komplexität der Ertragsgenerierung auf meteorologischen Monatswerte. Es fehlen beispielsweise Informationen zum Auftreten spezifischer Wetterereignisse, zu Schädlingsbefall und zum Düngeregime. Die bisher vorliegenden Impaktdaten sind für eine robuste Bewertung von Zusammenhängen zwischen der Ausprägung der Trockenheitsindizes und den beobachteten Trockenheitsauswirkungen unzureichend. Hier kann der Aufbau einer Impaktdatenbank helfen die Datenbasis für derartige Analysen zu verbessern.

Forstliche Trockenschäden sind tendenziell auf kurzfristige Wasserdefizite zurückzuführen, insbesondere auf einen trockenen Oberboden. Grundsätzlich reagiert der Jungwuchs empfindlicher auf trockene Bedingungen als der Altbestand, da ihm die entsprechenden Reserven zum Umgang mit Trockenheit fehlen, seine Wurzeln noch nicht so tiefe Wasserressourcen erschließen können und sich frisch gepflanzte Bäume/Pflanzen an dem jeweiligen Standort erst etablieren müssen. Für die von Waldbrand betroffene Forstfläche sowie die Anzahl von Waldbränden zeigen sich enge Zusammenhänge zu meteorologischen Indizes. Kurz- bis mittelfristige Trockenheiten führen demzufolge zu häufigen Waldbränden mit großen betroffenen Arealen. Eindeutige Zusammenhänge zwischen Trockenheit und befallenen Holzmengen sind bei den Forstschädlingen Kupferstecher und Buchdrucker festzustellen. Jedoch spielen weitere Einflussfaktoren eine Rolle, z.B. Temperaturverlauf, Temperatursumme und Sonnenscheindauer in der Entwicklungszeit sowie die Fitness der Bäume (Sturm, Trockenheit).

Auch auf die Hydrologie von Einzugsgebieten wirken sich nachgewiesenermaßen Trockenperioden aus. Niederschlag und Verdunstung der letzten drei bis sechs Monate zeigen die stärksten Zusammenhänge zu Abflüssen. Das Grundwassers besitzt ein „längere Gedächtnis“, was sich in den engen Korrelationen zu den längeren Wirkungszeitskalen der Trockenkennwerte manifestiert.

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen stellte die Bodentrockenheit dar. Der Bodenfeuchteindex SMI stellt eine normierte Anomalie der mittleren Bodenfeuchten dar und ist bei Unterschreiten bestimmter Schwellwerte ein Maß für die Bodentrockenheit. Der SMI ist die Grundlage für den Dürremonitor Deutschland und ist von hoher praktischer Bedeutung für Anwender, z.B. für Land- und Forstwirte. Für Sachsen wurden statistische Untersuchungen der Zeitreihe 1951–2017 durchgeführt, um zeitliche und räumliche Trends in den Charakteristika der Bodentrockenheiten zu identifizieren.

In der aktuellen Periode 1991–2017 fallen Regionen im Nordosten, Norden und Südwesten mit erhöhten Häufigkeiten von Bodentrockenheit im Gesamtboden gegenüber 1961–1990 auf. Die dekadische Variabilität ist hoch: Bodentrockenheiten häuften sich in 2001–2010 im Osten Sachsens und in 2011–2017 eher im Westen. Auffällig ist die Zunahme räumlicher Gradienten in den letzten Dekaden. Die Klasse „Schwere Dürren“ kam in den letzten Dekaden ebenfalls verstärkt im Osten vor. Insbesondere im Frühling und Sommer – und hier speziell in der Vegetationsperiode (VP) I – häuften sich Bodentrockenheiten in vielen Regionen Sachsens. Im Oberboden sind kaum räumliche Differenzierungen und kaum zeitliche Veränderungen zwischen den zwei Hauptperioden zu erkennen. Die aktuellen Entwicklungen zeigen jedoch ebenfalls eine starke Zunahme von Bodendürren im Frühling, und hier insbesondere in der VP I. In den übrigen Jahreszeiten nehmen Dürren ab.

Die Analyse langanhaltender Bodendürren im Gesamtboden verdeutlicht: Es findet eine regionale Umverteilung von 3-monatigen leichten und mittleren Dürren statt, mit einem neuen regionalen Dürreschwerpunkt im Osten bzw. Nordosten Sachsens. ‚Extreme‘ und ‚Außergewöhnliche Dürren‘ sind in der rezenten Periode rückläufig. Die aktuellen Entwicklungen zeigen eine leichte Abnahme dreimonatiger Bodendürren im Oberboden. Für die weiterhin untersuchten Dürreandauern von 4 – 24 Monate sind die Resultate sehr ähnlich. Als Dürre-Hotspots sind auch hier der Osten/Nordosten, das Vogtland und die Region Düben-Dahleiner Heide/ Nordsächsisches Platten und Hügelland zu erkennen.

Die Ergebnisse der meteorologischen Kennwerte werden durch die Ergebnisse der Bodendürren bestätigt, was den starken Zusammenhang zwischen diesen Größen aufzeigt.

Um zu identifizieren, welche der untersuchten Trockenheitskennwerte am besten in der Lage ist Trockenzeiten zu beschreiben, fand ein Abgleich mit unabhängigen Daten statt – dem Vegetationsindex NDVI und dem Bodenfeuchte-

index SMI. Für die Validierung der meteorologischen Indizes wurde die Wachstumsperiode (Mai-Oktober) ausgewählt, da nur in dieser Zeit ein Trockenstress bedingter Zusammenhang zum NDVI auftritt. Bis auf die höchst gelegenen Regionen beeinflussen die Feuchtigkeitsverhältnisse in einem gewissen Maße den NDVI (Tabelle 15). Maximal 75 %, oft aber auch nur 25 %, der Variabilität des NDVI kann mit den untersuchten meteorologischen Indizes erklärt werden. Ein direkter Einfluss der Temperatur, land- und forstwirtschaftliches Management (z. B. Ernte) etc. sind weitere Faktoren, die den NDVI beeinflussen, aber hier keine Berücksichtigung fanden. Der Bodenfeuchteindex des Gesamtbodens wird von den Feuchtigkeitsverhältnissen der vorangegangenen 3 bis 6 Monate beeinflusst. Für den Oberboden sind 2 Monate relevant, die Zusammenhänge sind etwas strenger als beim Gesamtboden (40-81 % der Varianz können erklärt werden im Vergleich zu 29-72%). Insgesamt die stärksten Zusammenhänge ergeben sich zwischen dem SPEI und dem mittleren Bodenfeuchteindex der Wachstumsperiode (50-81% für SMI_{Ges} und 60-83% für SMI_{Ober}).

Vergleiche mit Ergebnissen anderer Forschergruppen zeigen gleichwertige bzw. bessere Zusammenhänge zwischen SPI, SPEI und dem NDVI. Die Zusammenhänge der meteorologischen Kennwerte zum Bodenfeuchteindex sind noch ausgeprägter. Somit können die Indizes SPI und SPEI als geeignete Trockenheitsmerkmale eingeschätzt werden. Der RDI – als eine Variante zum SPEI – weist weniger starke Zusammenhänge auf und bringt somit keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Einschränkend sei darauf hingewiesen, dass die Validierung der Trockenkennwerte von der Genauigkeit der hydrologischen Modellierung zur Bestimmung des SMI und der Satellitendaten abhängt.

Es wurde der Frage nachgegangen, ob eine Kombination von Trockenkennwerten zu robusteren Ergebnissen führt als einzelne Kennwerte. Eine arithmetische bzw. gewichtete Mittelung von Trockenkennwerten führt nur selten zu einer besseren Identifizierung von Trockenperioden. Erst durch Anwendung einer Multiple Lineare Regression (MLR) in die alle drei meteorologischen Kennwerte inklusive einer zeitlichen Verschiebung eingehen, gelingt eine Verbesserung auf Stationsebene. Um zu einer praktikablen, flächenhaften Lösung für Sachsen zu kommen, wurde eine MLR mit dem SPEI verschiedener Aggregierungsstufen abgeleitet, um die Bodenfeuchteverhältnisse im Ober- und Gesamtboden zu bestimmen. Standardmäßig erhobenen Klimabeobachtungen sowie Daten aus Klimaprojektionen können nun zum einen direkt zur Ableitung von Trockenheitskennwerten genutzt werden: Häufigkeit, Andauer und Intensität von SPI oder SPEI-Trockenperioden. Zum anderen werden durch Ableitung des Bodenfeuchteindex noch stärker anwenderbezogene Aussagen ermöglicht.

Tabelle 15: Erklärte Varianz (R²) der Korrelation zwischen NDVI und SPEI bzw. SMI und SPEI. Es werden die Monate der Wachstumssaison einzeln betrachtet bzw. zusammen.

Zusammenhang zwischen ...	Aggregierung 1-2 Monate	Aggregierung 3-6 Monate	Aggregierung ≥ 6 Monate	Kommentar
NDVI-SPEI - Monatsweise	25-75%.			Für 5 von 6 Stationen signifikant
NDVI-SPEI - Wachstumssaison			25-65%....	Für 4 von 6 Stationen signifikant
SMI _{Ges} -SPEI - Monatsweise		29-72 %....		Signifikant
SMI _{Ges} -SPEI - Wachstumssaison			50-81%....	Signifikant
SMI _{Ober} -SPEI - Monatsweise	40-81%....			Signifikant
SMI _{Ober} -SPEI - Wachstumssaison			60-83%....	Signifikant

Es wurde ein umsetzungsfähiges Konzept zur Erfassung, Abschätzung und Darstellung von bisherigen und möglichen zukünftigen Änderungen im Auftreten von Trockenheitssituationen erarbeitet, dessen Anwendung auf eine neue klimatologische Datengrundlage vorgesehen ist. Das sind zum einen zwei beobachtete, unabhängige 30-jährige Klimanormalperioden (1961–1990 und 1991–2020) und zum anderen die aktuellen Klimaprojektionen für den Zeitraum 1961–2100. Die Basis bilden Atmosphärenparameter, deren Verfügbarkeit sowohl in langfristigen Beobachtungen als auch in Klimaprojektionen gegeben ist. Um Aussagen für weniger gut meteorologisch beobachtete Regionen zu ermöglichen, sollte eine sachsenweite Berechnung von Trockenkennwerten mittels flächenhafter Daten erfolgen. Nach Abschluss des Messjahres 2020 sollte eine aktuelle Version des Klima-Referenzdatensatzes erstellt und nachfolgend auf ein 1 x 1 km²

Gitter interpoliert werden. Für Betrachtungen in der Zukunft sind aktuelle Klimaprojektionen zu verwenden. Die Trockenheitsindizes SPI und SPEI sind hinsichtlich ihrer Auftretenshäufigkeit, Andauer, Ausmaß und Intensität zu charakterisieren. Die Anwendung sollte auf typische Aggregierungszeiträume von SPI und SPEI von 1, 3, 6, 12 und 24 Monaten erfolgen, um Auswirkungen auf Land- und Forstwirtschaft, Hydrologie und Grundwasser zu berücksichtigen. Um innerjährliche Veränderungen zu identifizieren und Aussagen für relevante Zeiträume der verschiedenen Bereiche zu generieren, sollten neben jährlichen Analysen die meteorologischen und hydrologischen Halbjahre, die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden I und II betrachtet werden. Analysen von klimatologischen bzw. aktuellen Anomalien sollten stets auf die Referenzperiode 1961–1990 bezogen werden. Als noch stärker anwendungsorientiertes Maß für die Trockenheit wurde aus einer Kombination von atmosphärischen Trockenkennwerten mittels multipler linearer Regression der Bodenfeuchtindex für Ober- und Gesamtboden abgeleitet. Es werden verschiedene Arten von Darstellungen zur Analyse der Trockenkennwerte empfohlen, wie z. B. Karten (räumliche Verteilung der Charakteristika von Trockenheiten) oder Zeitreihendarstellungen. Desweiteren werden Sektor spezifisch Empfehlungen für typische Analysegegenstände, sinnvolle Indikatoren und Darstellungsformen gegeben.

8 Ausblick

Um die Zusammenhänge zwischen meteorologischen Kennwerten und deren sozioökonomischen Auswirkungen noch besser zu verstehen sind flächenhaft detailliertere Daten zu Erträgen, Schäden etc. nötig. Auch die Länge der Zeitreihen sollte, z. B. durch Aufarbeiten von Archivdaten, erweitert werden. Die Zusammenhänge zwischen Impaktdaten und deren Einflussfaktoren sind komplex; für eine realitätsnähere Beschreibung sind demzufolge auch mehr relevante Faktoren zu berücksichtigen (z. B. Temperaturverlauf und Sonneneinstrahlung beim Schädlingsbefall von Bäumen).

Damit die Erkenntnisse der Trockenheitsstudien effektiver genutzt werden können, sollten Tools (z. B. in ReKIS) geschaffen werden, um bedarfsgerecht Ausschnitte aus Sachsen bezüglich Trockenheit zu analysieren. Die relevanten Daten liegen flächenhaft vor; somit ermöglicht ein Verschneiden mit Polygonen oder einer vom Nutzer vorgegebenen Bounding Box spezifische Analysen.

Die sehr trockenen Jahre 2018 und 2019 verhalten sich deutlich anders als die Niederschlagstrends in den letzten Jahren. Interessant wäre es zu analysieren, ob es hinsichtlich langanhaltender Trockenphasen eventuell zu einer Trendumkehr kommt.

9 Referenzen

- AppEEARS Team: Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS). Ver. 2.14.2. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, USA, (2018), <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears> Zugriff: 24.1. 2019
- ASADI ZARCH, M.A., SIVAKUMAR, B., SHARMA, A: Droughts in a warming climate: a global assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI). *Journal of Hydrology* 526 (2015), 183–195, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071>
- BACHMAIR, S., KOHN, I., STAHL, K.: Exploring the link between drought indicators and impacts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 15 (6) (2015a), S. 1381-1397
- BACHMAIR, S., SVENSSON C., HANNAFORD J., BARKER L. J. UND K. STAHL: A quantitative analysis to objectively appraise drought indicators and model drought impacts. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 12 (9) (2015b), S. 9437-9488
- Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Auswirkungen der Trockenheit 2003 für die Waldsituation 2004. In: *LWF aktuell* 43 (2004): 44 S.
- BERNHOFER, C., FRANKE, J., KURBJUHN C. UND HUPE F.: Ableitung von Rasterdaten aus gemessenen und projizierten Klimazeitreihen für den Freistaat Sachsen. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2009), Dresden
- BERNHOFER, C., FRANKE, J., DONIX, T., KÖRNER, P., FISCHER, S., SCHALLER, A., KIRSTEN, L., PRASSE, H., KOSTROWSKI, D.: Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen. Schriftenreihe des LfULG, Heft 3/2015 (2015a)
- BERNHOFER, C., HÄNSEL, S., SCHALLER, A., PLUNTKE, T.: Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit, Schriftenreihe des LfULG, Heft 7/2015 (2015b), <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/24200>, Zugriff: 21.09.2015
- BERNHOFER, C., PLUNTKE, T., SCHALLER, A.: Witterungsextreme im WEREX-V-Ensemble, Schriftenreihe des LfULG, Heft 9/2016 (2016)
- Bernhofer, C., Schaller, A., Pluntke, T.: Starkregenereignisse von 1961 bis 2015, Schriftenreihe des LfULG, Heft 5/2017 (2017)
- BLOOMFIELD, J. P. UND B. P. MARCHANT: Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17/12 (2013), S. 4769–4787
- DIDAN, K.: MYD13A3 MODIS/Aqua Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V006. NASA EOSDIS LP DAAC (2015), doi: 10.5067/MODIS/MYD13A3.006
- DVWK (Hrsg.): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Merkblatt M 504 (2002)
- ELAGIB, N.A., ELHAG, M.M.: Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology*, 409 (2011) (3–4), S. 612–625
- ENKE, W., SPEKAT, A., KREIENKAMP, F.: Classification by Multiple Regression - A New Approach Towards the Classification of Extremes. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, 1-15 (2016)
- FARAJALLAN, N., ZIADE, R.: Drought frequency under a changing climate in the Eastern Mediterranean: the Beka'a Valley, Lebanon. *Geophysical Research Abstracts*, 12 (2010) EGU2010–11653
- FEDERER, C.A.: BROOK 90: A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. (2002), <http://www.ecoshift.net/brook/brook90.htm>, Zugriff: 20.8.2019
- GIMBEL, K.F. PUHLMANN, H., WEILER M.: Does drought alter hydrological functions in forest soils? *Hydrology and Earth system Sciences* 20 (2016), S. 1301–1317, doi:10.5194/hess-20-1301-2016
- GUPTA, H.V. et al.: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377 (1–2) (2009), S. 80–91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- HALWATURA, D., MCINTYRE, N., LECHNER, A.M., ARNOLD, S.: Capability of meteorological drought indices for detecting soil moisture droughts. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 12 (2017), S. 396–412

- HÄNSEL, S., RUMPF, D., MEIßNER, S., MATSCHULLAT, J.: Flächenhafte Trockenheitsanalyse und Konzepterstellung für die impaktororientierte Erfassung und Charakterisierung von Trockenheit für den Freistaat Sachsen. Abschlussbericht eines F&E Projektes des LfULG (2016), 191 S.
- HÄNSEL, S., SCHUCKNECHT, A., BÖTTCHER, F., BERNHOFER, C., MATSCHULLAT, J.: Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100. Starkniederschlags- und Trockenheitstrends. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Band 246 (2015), Offenbach am Main. Internet: <http://d-nb.info/1077116861/34>, Zugriff: 20.8.2019
- HAYES, M. (1999): Drought Indices, <http://www.civil.utah.edu/~cv5450/swsi/indices.htm>, Zugriff: 29.10.2015
- KIRONO, D.G.C., KENT, D.M., HENNESSY, K.J., MPELASOKA, F.: Characteristics of Australian droughts under enhanced greenhouse conditions: results from 14 global climate models. *Journal of Arid Environments*, 75 (2011), (6), S. 566–575
- KÖRNER, P., KRONENBERG, R., GENZEL, S., BERNHOFER, C.: Introducing Gradient Boosting as a universal gap filling tool for meteorological time series. *Meteorologische Zeitschrift* 27/ 5 (2018), S. 369-376
- KOUSARI, M.R., DASTORANI, M.T., NIAZI, Y., SOHEILI, E., HAYATZADEH, M., CHEZGI, J.: 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 (2014), S. 1857-1872
- KRONENBERG, R., OEHLISCHLÄGEL, L.M.: BROOK90 in R - Manual for the Usage of the BROOK90 in R Implementation (2019), https://github.com/rkronen/Brook90_R, Zugriff: 21.05.2019
- LFULG: Hydrologisches Handbuch. Materialien zur Wasserwirtschaft. Dresden, (2014), <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13700>, Zugriff: 22.05.2019
- LI, Z., ZHOU, T., ZHAO, X., HUANG, K., GAO, S., WU, H., LUO, H.: Assessments of drought impacts on vegetation in China with the optimal time scales of the climatic drought index. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 /7 (2015), S. 7615–7634
- LÓPEZ-MORENO, J.I., VICENTE-SERRANO, S. M., ZABALZA, J., BEGUERÍA, S., LORENZO-LACRUZ, J., AZORIN-MOLINA, C., MORÁN-TEJEDA, E.: Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. In: *Journal of Hydrology* 477 (2013), S. 175–188
- LORENZO-LACRUZ, J., S. M. VICENTE-SERRANO, J. I. LÓPEZ-MORENO, S. BEGUERÍA, J. M. GARCÍA-RUIZ UND J. M. CUADRAT : The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). In: *Journal of Hydrology* 386/1–4 (2010), S. 13–26
- LOTSCH A., FRIEDL, M.A., ANDERSON B.T, TUCKER, C.J.: Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records. *Geophysical Research Letters* 30 (14) (2003), doi:10.1029/2003GL017506
- MAYBANK, J., B. BONSAI, K. JONES, R. LAW FORD, E. G. O'BRIEN, E. A. RIPLEY UND E. WHEATON: Drought as a natural disaster. In: *Atmosphere-Ocean* 33/2 (1995), S. 195–222
- MCEVOY, D.J., HUNTINGTON, J.L., ABATZOGLOU, J.T., EDWARDS, L.M.: An evaluation of multiscalar drought indices in Nevada and Eastern California. *Earth Interactions* 16/18 (2012), S. 1–18
- MCKEE, T B., DOESKEN, N.J., KLEIST, J. : The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston, Massachusetts: (1993), S. 179–184.
- METTE, T., T. RÖTZER UND H. PRETZSCH: Ein Dürre-Index für die Forstwirtschaft? LWF-aktuell. München (2011)
- MING, B., GUO, Y., TAO, H., LIU, G., LI, S., WANG, P.: SPEIPM-based research on drought impact on maize yield in North China Plain. In: *Journal of Integrative Agriculture* 14/4 (2015), S. 660–669
- PALMER, W.C.: Meteorological Drought, Research Paper No. 45 (1965)
- PASHO, E., CAMARERO, J.J., DE LUIS, M., VICENTE-SERRANO, S.M.: Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 151/12 (2011), S. 1800–1811
- PELED, E., DUTRA, E., VITERBO, P., ANGERT, A.: Technical Note: Comparing and ranking soil drought indices performance over Europe, through remote-sensing of vegetation. *Hydrological Earth System Sciences*, 14 (2010), S. 271–277
- PLAPP, S. T.: Wahrnehmung von Risiken aus Naturkatastrophen. Eine empirische Untersuchung in sechs gefährdeten Gebieten Süd- und Westdeutschlands, Karlsruhe, (2003), <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/3542003>, Zugriff: 15.7.2019
- PLUNTKE, T., BARFUS, K., HEIDENREICH, M., KRONENBERG, R., HAUFFE, C., WAGNER, M., SCHWARZE, R., GUTZMANN, B., BERNHOFER, C.: Klima-Referenzdatensatz Sachsen 1961-2015, Abschlussbericht zu einem FuE-Vorhaben des LfULG (2017)

- POTOP, V., MOŽNÝ UND SOUKUP J.: Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology* 156 (2012): S. 121–133
- RICHTER, D.: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 194(1995)
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., DEERING, D.W., SEHELL, J.A.: Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC 1978–4 (1974), Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.
- SAMANIEGO, L., R. KUMAR UND M. ZINK: Implications of Parameter Uncertainty on Soil Moisture Drought Analysis in Germany. *Journal of Hydrometeorology* 14/1 (2013), S. 47–68
- SAMANIEGO, L., KUMAR, R., ATTINGER, S.: Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46/5 (2010), doi:10.1029/2008WR007327
- SHUKLA, S. UND A. W. WOOD: Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. In: *Geophysical Research Letters* 35/2 L02405 (2008)
- SMAKHTIN, V.U., SCHIPPER, E.L.F.: Droughts: the impact of semantics and perceptions. *Water Policy* 10/2 (2008), S. 131–143
- SPEKAT, A., ENKE, W.: WMSax2.0 – Bereitstellung eines Ensembles regionaler Klimaprojektionen für Sachsen, Abschlussbericht zum F&E Projekt des LFULG (2018), 80 S.
- STAGGE, J.H., KOHN, I., TALLAKSEN, L.M., STAHL, K.: Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. *Journal of Hydrology* 530 (2015), S. 37–50
- STAHL, K., V. BLAUHUT, I. KOHN, V. ACÁCIO, D. ASSIMACOPOULOS, C. BIFULCO, L. DE STEFANO, S. DIAS, D. EILERTZ, B. FRIELINGS DORF, T. J. HEGDAHL, E. KAMPRAGOU, V. KOURENTZIS, L. MELSEN, H. VAN LANEN, A. F. VAN LOON, A. MASSARUTTO, D. MUSOLINO, L. DE PAOLI, L. SENN, J. H. STAGGE, L. M. TALLAKSEN UND J. URQUIJO:
A European Drought Impact Report Inventory (EDII): Design and Test for Selected Recent Droughts in Europe. DROUGHT-R&SPI Technical Report No. 3 (2012), <http://www.eu-drought.org/media/default.aspx/emma/org/10814306/DROUGHT-RSPI+Technical+Report+No.+3+-+A+European+Drought+Impact+Report+Inventory+%28EDII%29+Design+and+Test+for+Selected+Recent+Droughts+in+Europe.pdf>, Zugriff: 25.8.2018
- Thornswaite, C.W.: An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38/1 (1948), S. 55–94
- TSAKIRIS, G., VANGELIS, H.: Establishing a Drought Index incorporating evapotranspiration, *European Water* 9-10 (2005), S. 3–11
- TUCKER, C.J.: Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. – *Remote Sensing of Environment*, 8/2 (1979), S. 127–150
- VICENTE-SERRANO, S.M., LÓPEZ-MORENO, J.I. : Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 9/5 (2005), S. 523–533
- VICENTE-SERRANO, S.M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J.I.: A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index, *Journal of Climate*, 23 (2010), S. 1696–1718
- VICENTE-SERRANO, S. M., S. BEGUERÍA UND J. I. LÓPEZ-MORENO: Comment on “Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900–2008” by Aiguo Dai. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116/D19 (2011)
- VICENTE-SERRANO, S.M., BEGUERÍA, S., LORENZO-LACRUZ, J., CAMARERO, J.J., LÓPEZ-MORENO, J.I., CAMARERO, J.J., AZORIN-MOLINA, C., REVUELTO, J., MORÁN-TEJEDA, E., SANCHEZ-LORENZO, A.: Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications, *Earth Interactions* 16/10 (2012), S. 1–27
- VICENTE-SERRANO, S.M., CAMARERO, J.J., AZORIN-MOLINA, C.: Diverse responses of forest growth to drought time-scales in the Northern Hemisphere. *Global Ecology and Biogeography* 23/9 (2014), S. 1019–1030
- WANG, J., RICH, P.M., PRICE, K.P.: Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA, *International Journal of Remote Sensing*, 24:11 (2003), S. 2345-2364, DOI: 10.1080/01431160210154812
- WANG, Q., WU, J., LEI, T., HE, B., WU, Z., LIU, M., MO, X., GENG, G., LI, X., ZHOU, H., LIU, D.: Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. *Quaternary International* 349 (2014), S. 10–21

- WU, J., ZHOU, L., ZHANG, J., LIU, M., ZHAO, L., ZHAO, F.: Analysis of relationships among vegetation condition indices and multiple-time scale SPI of grassland in growing season," 18th International Conference on Geoinformatics, Beijing, (2010), S. 1-6, doi: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567752
- YENGOH G.T., DENT D., OLSSON L., TENGBERG A.E., TUCKER C.J.: Main Global NDVI Datasets, Databases, and Software. In: Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales. Springer Briefs in Environmental Science (2015): Springer, Cham
- ZARCH, M.A., MALEKINEZHAD, H., MOBIN, M.H., DASTORANI, M.T., KOUSARI, M.R.: Drought monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*, 25/13 (2011), S. 3485–3504
- ZINK, M., SAMANIEGO, L., KUMAR, R., THOBER, S., MAI, J., SCHÄFER, D., MARX, A.: The German drought monitor. *Environ. Res. Lett.* 11 074002 (2016), S. 1-9, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074002

Anhang

Anlage 1: Übersicht über die verwendeten Einzugsgebiete/Pegel nach dem Hydrologischen Handbuch Sachsen (LfULG 2014).....	110
Anlage 2: Übersicht über die verwendeten Grundwassermessstellen (Darstellung auf der Grundlage von Daten des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie).....	111
Anlage 3: Karten der Häufigkeit von schwerwiegender bis extreme Trockenheit (Unterschreitungshäufigkeit eines SPEI-Wertes von -1,5) für Frühling (SPEI-3 für Mai) und Sommer (SPEI-3 für August) sowie die Vegetationsperioden (VP-I: SPEI-3 für Juni; VP-II: SPEI-3 für September) für die Zeitscheiben 1961–1990 (links) und 1991–2014 (rechts).....	112
Anlage 4: Korrelationsmatrix zwischen Dürreindizes und landwirtschaftlichen Ertragsdaten in den Vegetationsperioden I und II.....	113
Anlage 5: Korrelationsmatrix zwischen Dürreindizes und Trockenschäden an jungen und alten Forstbeständen sowie Waldbrand.....	115
Anlage 6: Monatliche Korrelationskoeffizienten (Spearman-Rangkorrelationskoeffizient) zwischen dem SPI (links) bzw. dem SPEI (rechts) jeweils auf Wirkungszeitskalen zwischen 1 und 48 Monaten und den beobachteten Dürreschäden an Jungwuchs und in Altbeständen sowie dem Flächenanteil und der Anzahl von Waldbränden; Zeitraum: 1971-2014.....	116
Anlage 7: Korrelationsmatrix zwischen Dürreindizes und von Forstschädlingen befallenen Holzbestände (Festmeter).....	117
Anlage 8: Monatliche Korrelationskoeffizienten (Spearman-Rangkorrelationskoeffizient) zwischen dem SPI (links) bzw. dem SPEI (rechts) jeweils auf Wirkungszeitskalen zwischen 1 und 48 Monaten für die Häufigkeit verschiedener Eichenfraßgesellschaften (Eichenwickler, Frostspanner, Goldafter, Eichenmehlthau); Zeitraum: 1971-2014 (Goldafter nur bis 1999).....	118
Anlage 9: Korrelation des SSI-1 mit dem SPEI auf sechs verschiedenen Zeitskalen und für Verschiebungen zwischen den beiden Zeitreihen zwischen -24 bis +24 Monaten dargestellt für das EZG der Elbe sowie zwei unterschiedlich Zufluss-EZG; Zeitraum: 1961–2010.....	119
Anlage 10: Andauer von Bodentrockenheit verschiedener Andauern für die fünf SMI-Klassen und zwei Vergleichszeiträume im Gesamtboden	120
Anlage 11: Andauer von Bodentrockenheit verschiedener Andauern für die fünf SMI-Klassen und zwei Vergleichszeiträume im Oberboden	121

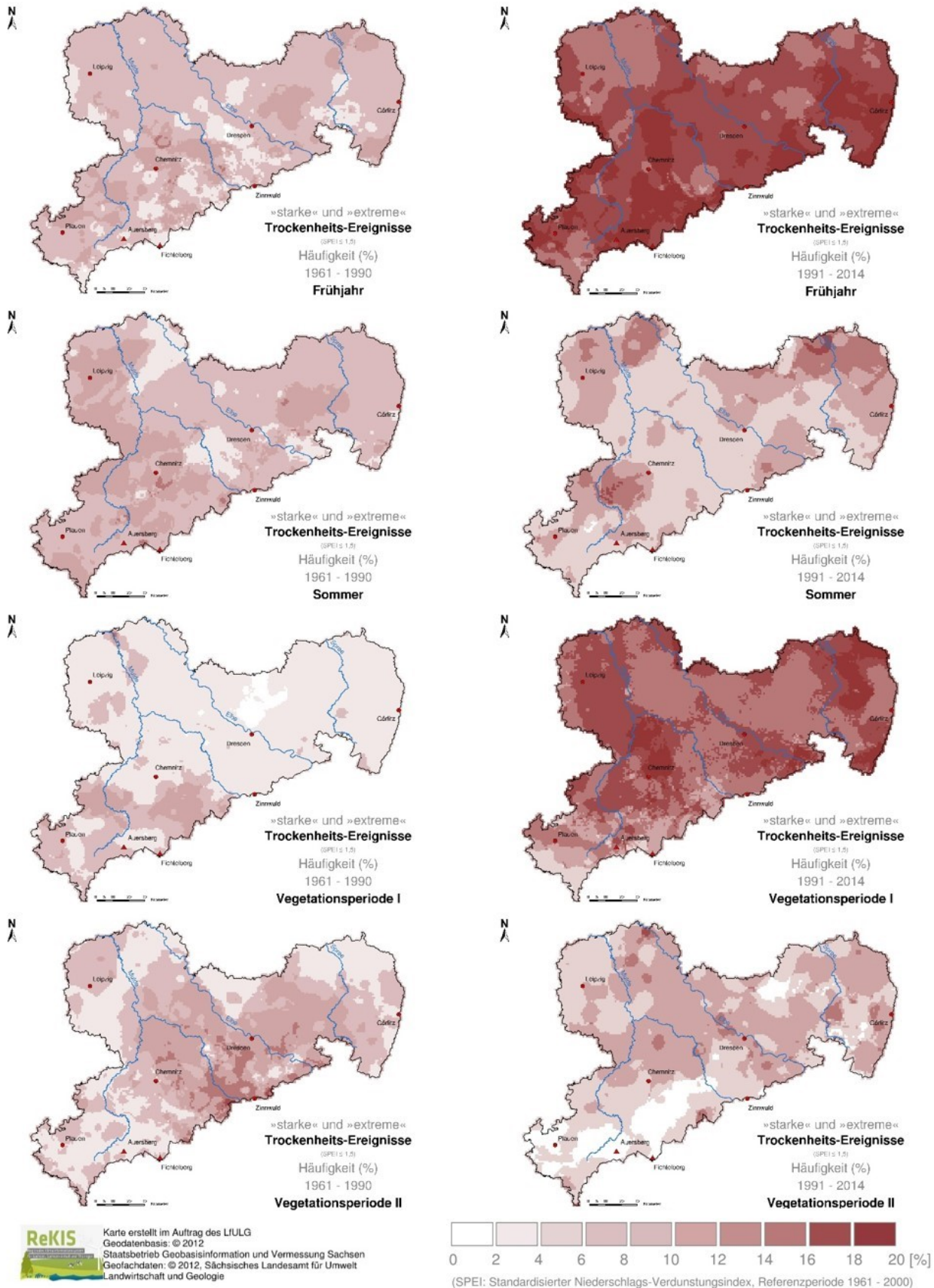
Anlage 1: Übersicht über die verwendeten Einzugsgebiete/Pegel nach dem Hydrologischen Handbuch Sachsen (LfULG 2014).

Pegelname (Nummer)	Gewässer (Gewässerfolge)	EZG in km²	Pegelnull in m ü. NN	Fehljahre / Beeinflussung / Anmerkungen
Torgau (50126.1)	Elbe	55211	75	ab 01.11.1995 neue Lage am Gewässer (alt: 154,6 km =Torgau 2, PKZ 50126.2) Pegelname geändert (alt: Torgau 1) Vorgängerpegel 50126.2; Beeinflussung durch tschechische Stauanlagen seit 1964
Dohna (55094.0)	Müglitz (Elbe)	199	136	Lücke: 2006 Beeinflussung durch HRB Lauenstein seit 2006
Klotzsche (55110.0)	Prießnitz (Elbe)	39,68	165	
Neuwiese (55302.0)	Schwarze Elster (Elbe)	669	110	Lücken: 1963, 1965 Beeinflussung durch Tagebauabsenkungstrichter und Fischteichbewirtschaftung; bis 1965 nur Lattenpegel
Zescha (55422.0)	Hoyerswerdaer (Schwarze Elster-Elbe)	181	141	Beeinflussung durch HRB seit 1962
Pietzschwitz (55426.0)	Langes Wasser (Schwarzwasser-Schwarze Elster-Elbe)	42,29	171	Beeinflussung durch HRB seit 1962
Bad Dübén 1 (56005.1)	Vereinigte Mulde (Elbe)	6170	82	Vorgängerpegel 56005.0
Chemnitz 1 (56440.0)	Chemnitz (Zwickauer Mulde - Vereinigte Mulde - Elbe)	403	287	Lücke: 1980-1984
Wolfsgrund (56700.0)	Chemnitzbach (Freiberger Mulde-Vereinigte Mulde-Elbe)	35,84	469	05/99 Lage am Gewässer korrigiert (alt. links)bis 17.08.1999 PNP 468,83 m ü. NN aS
Oelsnitz (57641.0)	Weißer Elster (Saale-Elbe)	328	392	PNP 392,513 m ü. NN bis 1983
Kleindalzig (57663.1)	Weißer Elster (Saale-Elbe)	2909	120	bis 17.05.2000 PNP 119,75 m ü. NN nS bis 01.01.2001 PNP 119,703 m ü. NN nS Lücke: 1979-1981
Großbardau (57817.0)	Schnellbach (Parthe-Weißer Elster-Saale-Elbe)	8,6	151	Lücken: 1993, 2008, 2009 08.11.2005 - 24.04.2006 Pegel- und Messwehrneubau
Ebersbach (58200.0)	Spree (Havel-Elbe)	16,83	344	bis 31.12.1998 TW-Pegel 01.11.1990 Absenkung PNP um 1,0 m ohne Änderung PKZ, W-Statistik unkorrigiert
Bautzen-Weite Bleiche (58203.0)	Spree (Havel-Elbe)	276	187	01.11.1962 - 31.10.1999 TW bis 08/2009 PNP 187,215 m ü. HN
Spreewitz (58282.0)	Spree (Havel-Elbe)	2067	99	Beeinflussung durch TS Bautzen seit 1975, sowie Tagebauwassereinleitungen, Entnahmen und Tagebauabsenkungstrichter
Görlitz (66016.0)	Lausitzer Neiße (Oder)	1633	176	Beeinflussung durch Entnahme für Tagebauflutung und TS Niedow/Witka
Seiffhennersdorf (66200.1)	Mandau (Lausitzer Neiße-Oder)	75,49	339	10.01.2003 Messstellennr. rückwirkend geändert (alt 66206.0) Vorgängerpegel 66200.0
Tauchritz (66309.0)	Pließnitz (Lausitzer Neiße-Oder)	163	197	

Anlage 2: Übersicht über die verwendeten Grundwassermessstellen (Darstellung auf der Grundlage von Daten des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie).

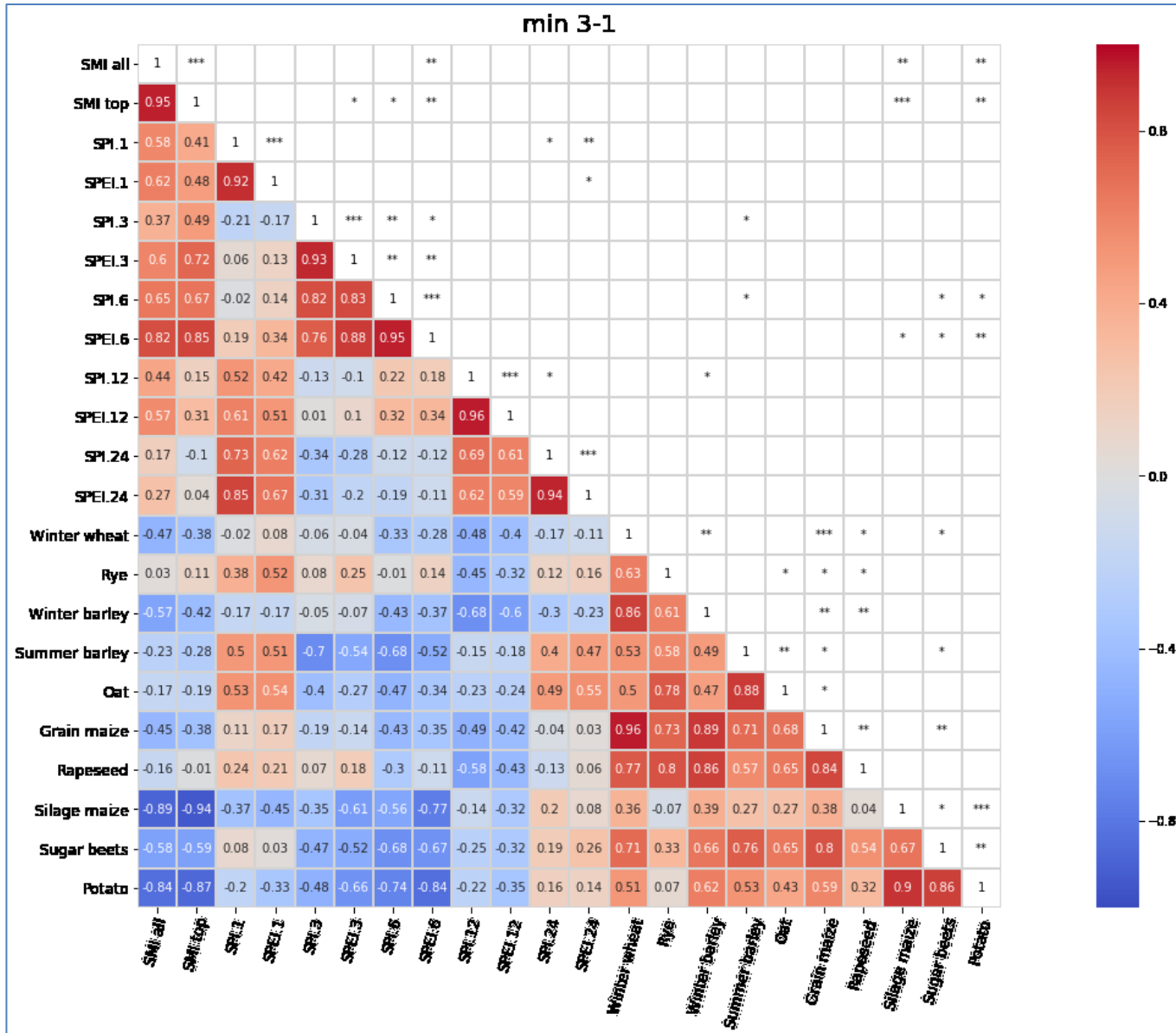
Grundwassermessstelle (Nummer)	EZG	Messpunkthöhe in m ü.	Mittlerer Grundwasserflurabstand in m u. Gelände	Petrographie/Lithologie
Brandis (46410074)	Weißer Elster	139,16 (NN)	2,0 (grundwassernah)	Sand, Kies
Bernsdorf (52411193)	Vereinigte Mulde	306,14 (HN)	6,2 (grundwasserfern)	Schluff- und Tonstein, Sandstein, Konglomerat, Kalkstein
Walda (46460564)	Schwarze Elster	109,52 (HN)	1,9 (grundwassernah)	Sand
Schlottwitz (51481216)	Elbe	233,71 (NN)	2,1 (grundwassernah)	Biotit- bis Zweiglimmer- Zweifeldspat-Orthogneis
Ebersbach (49530979)	Spree	394,45 (NN)	2,3 (grundwassernah)	Kies, Sand, Schluff
Dittelsdorf (50550642)	Lausitzer Neiße	260,81 (NN)	4,3 (grundwasserfern)	Kies, Sand, Schluff

Anlage 3: Karten der Häufigkeit von schwerwiegender bis extreme Trockenheit (Unterschreitungshäufigkeit eines SPEI-Wertes von -1,5) für Frühling (SPEI-3 für Mai) und Sommer (SPEI-3 für August) sowie die Vegetationsperioden (VP-I: SPEI-3 für Juni; VP-II: SPEI-3 für September) für die Zeitscheiben 1961–1990 (links) und 1991–2014 (rechts).

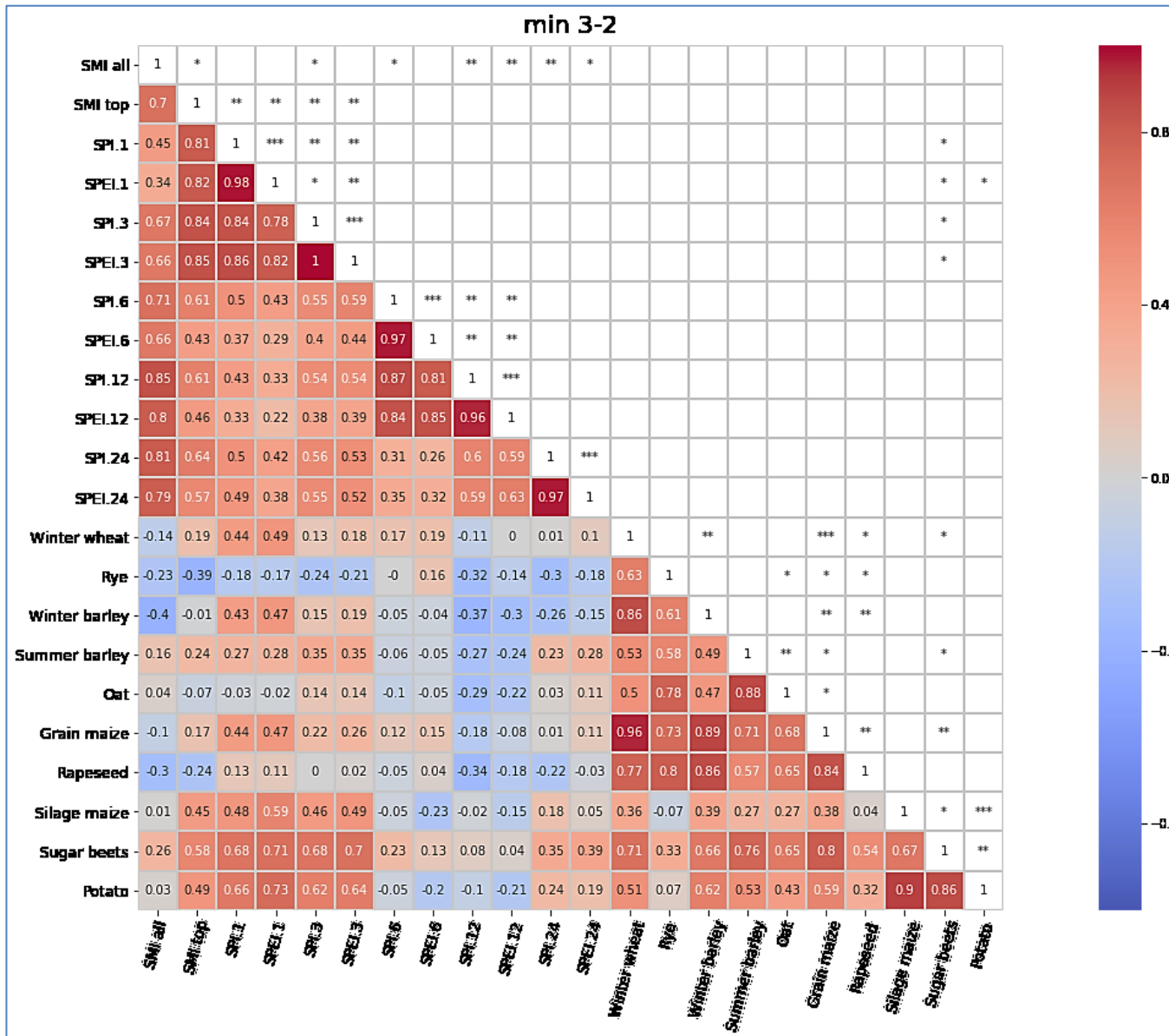


Anlage 4: Korrelationsmatrix zwischen Dürreindizes und landwirtschaftlichen Ertragsdaten in den Vegetationsperioden I und II

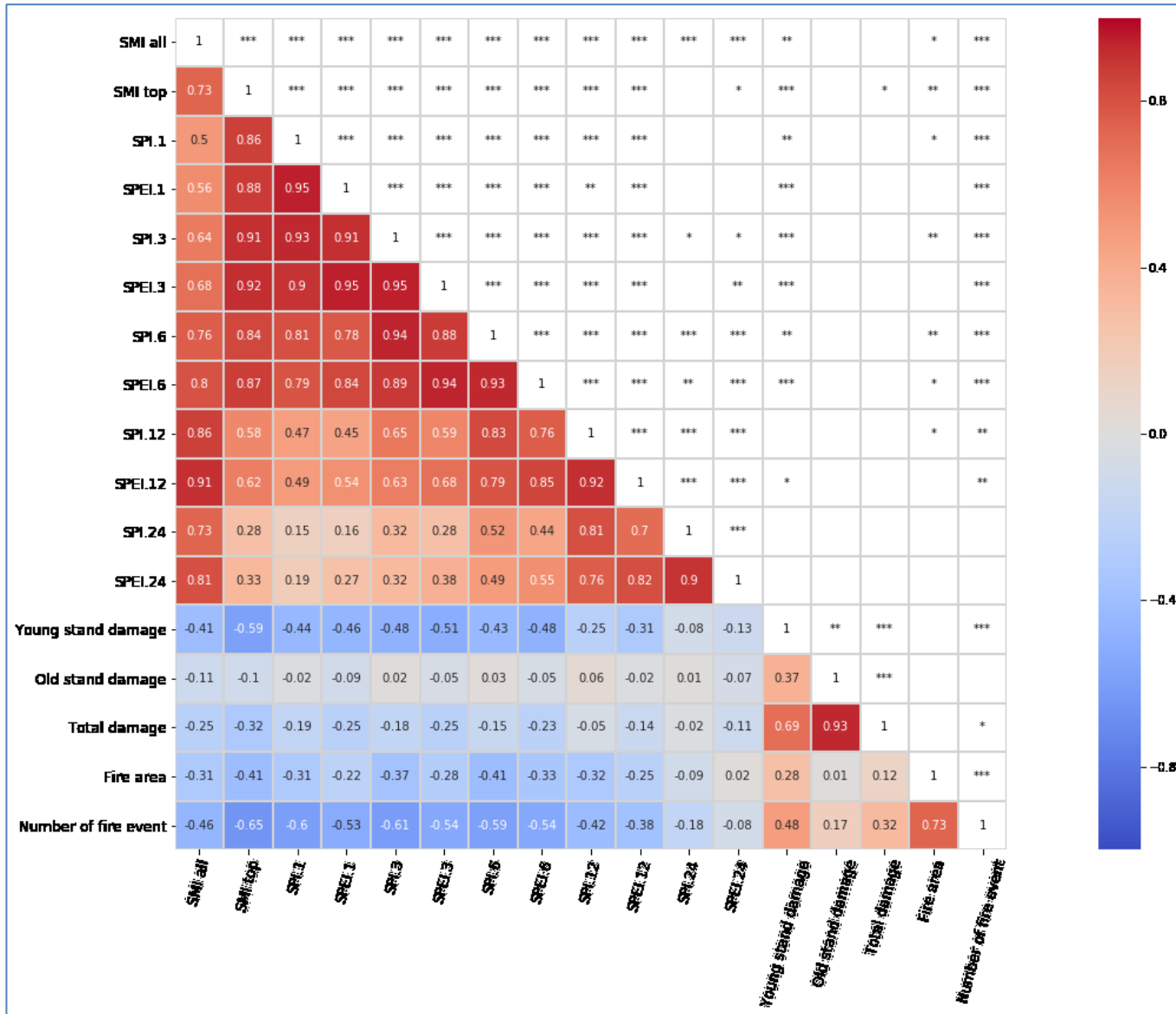
Vegetationsperiode I



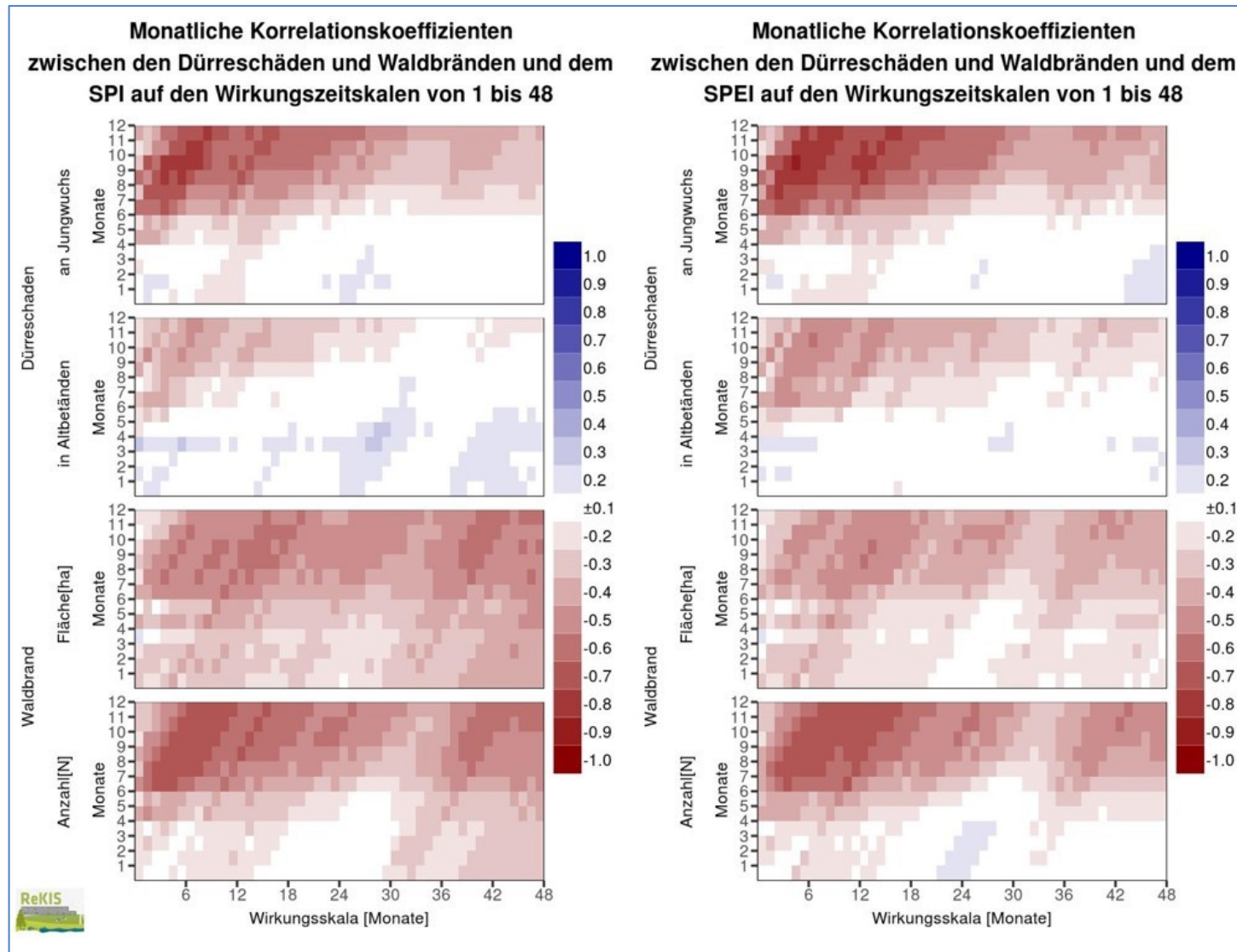
Vegetationsperiode II



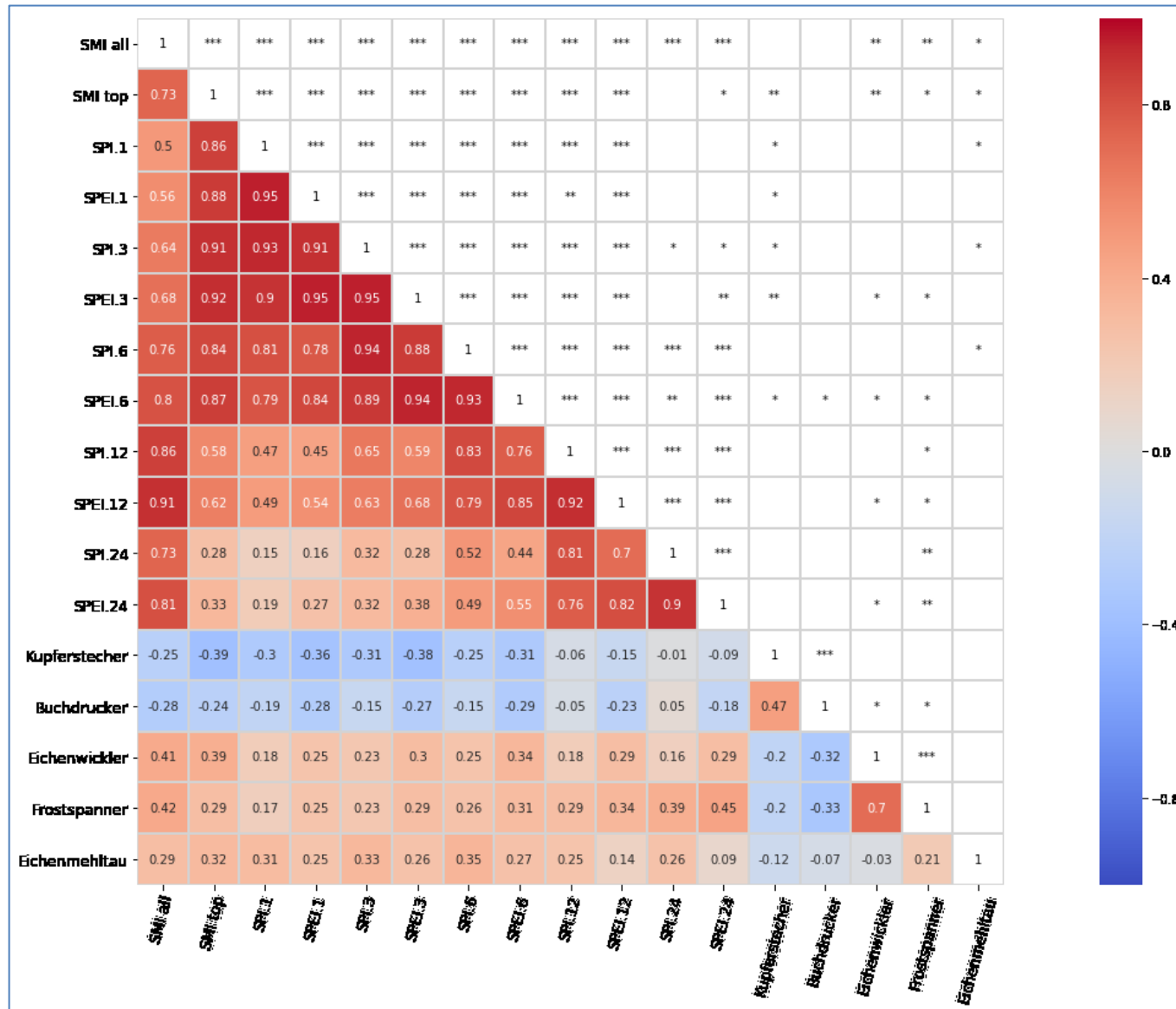
Anlage 5: Korrelationsmatrix zwischen Dürreindizes und Trockenschäden an jungen und alten Forstbeständen sowie Waldbrand



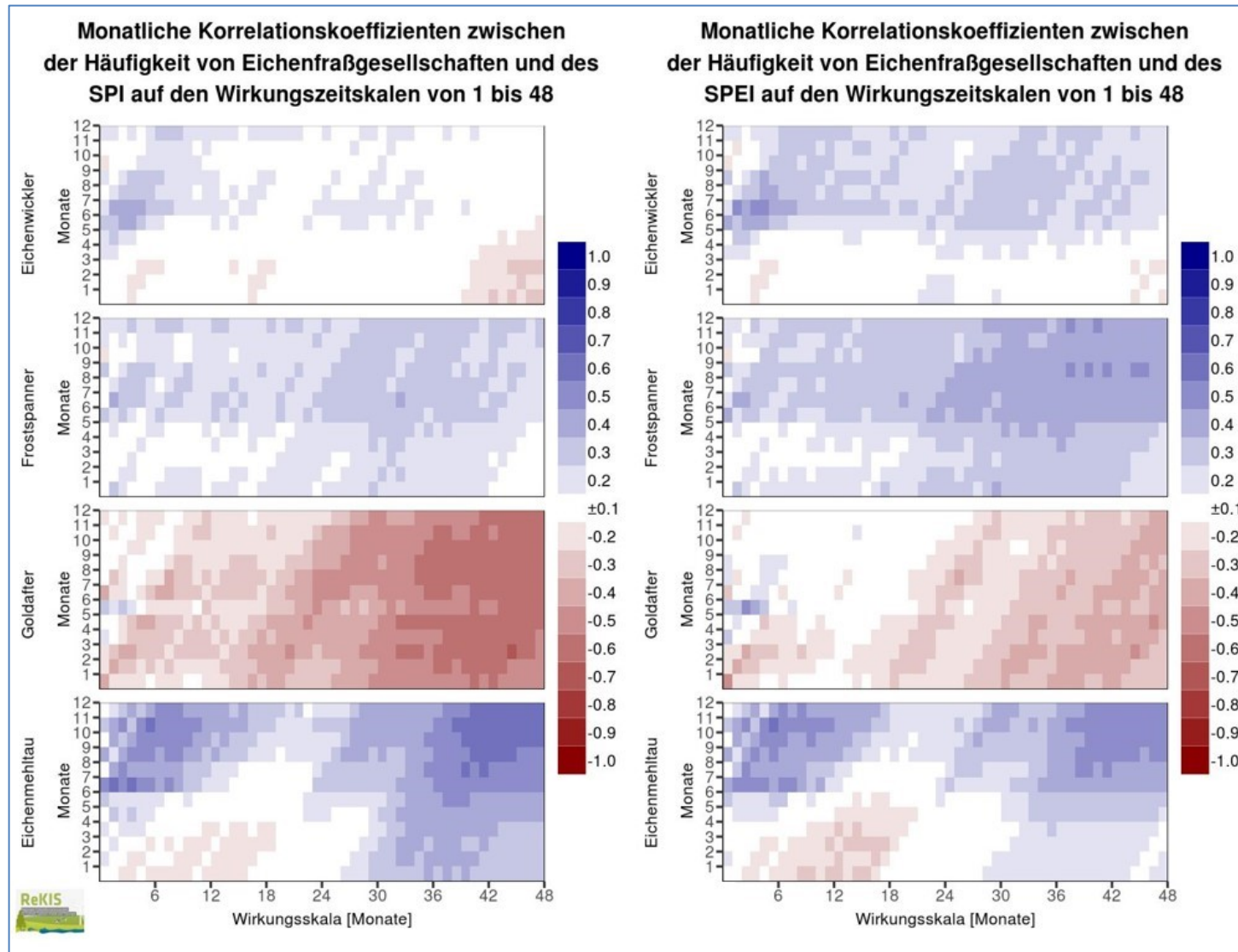
Anlage 6: Monatliche Korrelationskoeffizienten (Spearman-Rangkorrelationskoeffizient) zwischen dem SPI (links) bzw. dem SPEI (rechts) jeweils auf Wirkungszeitskalen zwischen 1 und 48 Monaten und den beobachteten Dürreschäden an Jungwuchs und in Altbeständen sowie dem Flächenanteil und der Anzahl von Waldbränden; Zeitraum: 1971-2014.



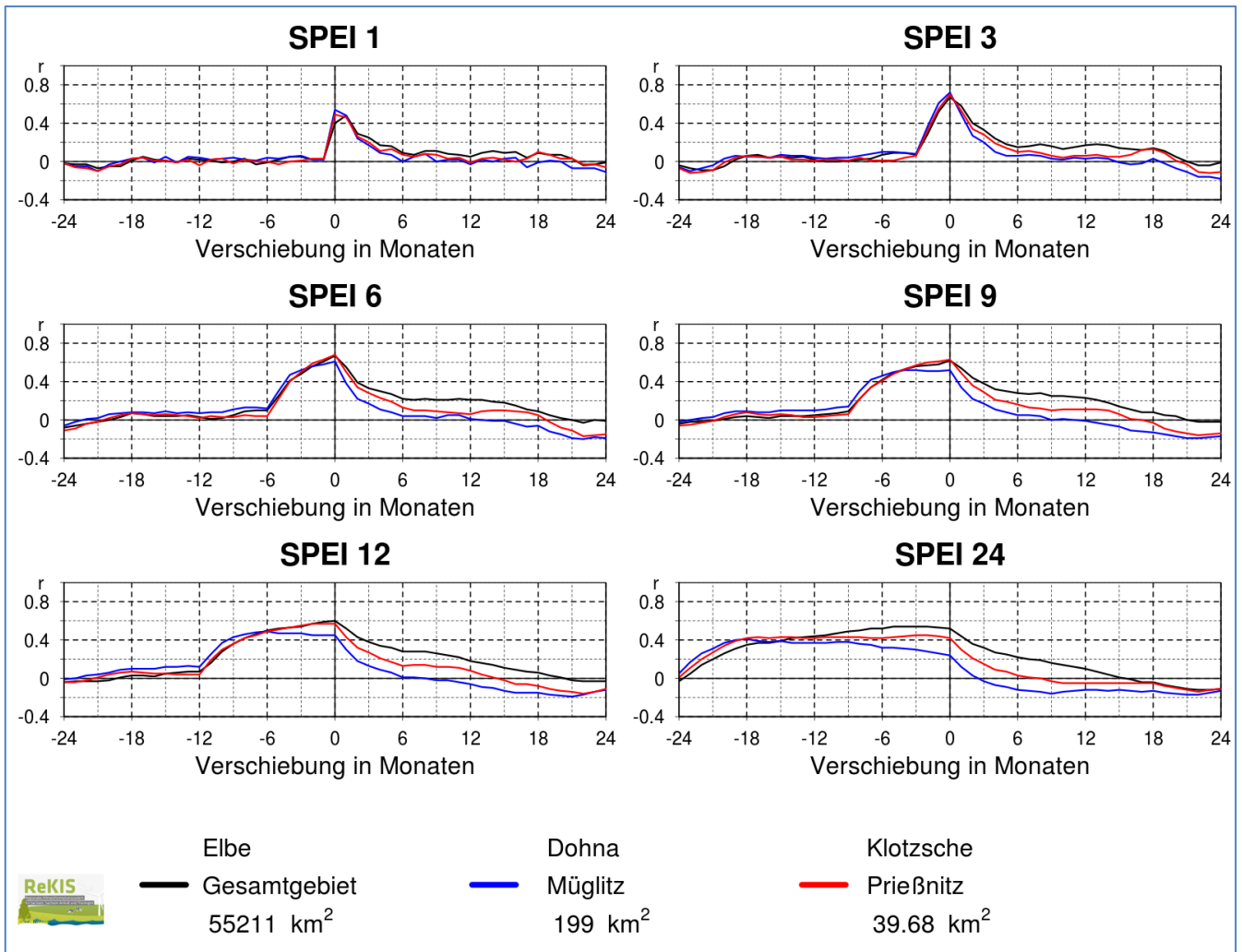
Anlage 7: Korrelationsmatrix zwischen Dürreindizes und von Forstschädlingen befallenen Holzbestände (Festmeter)



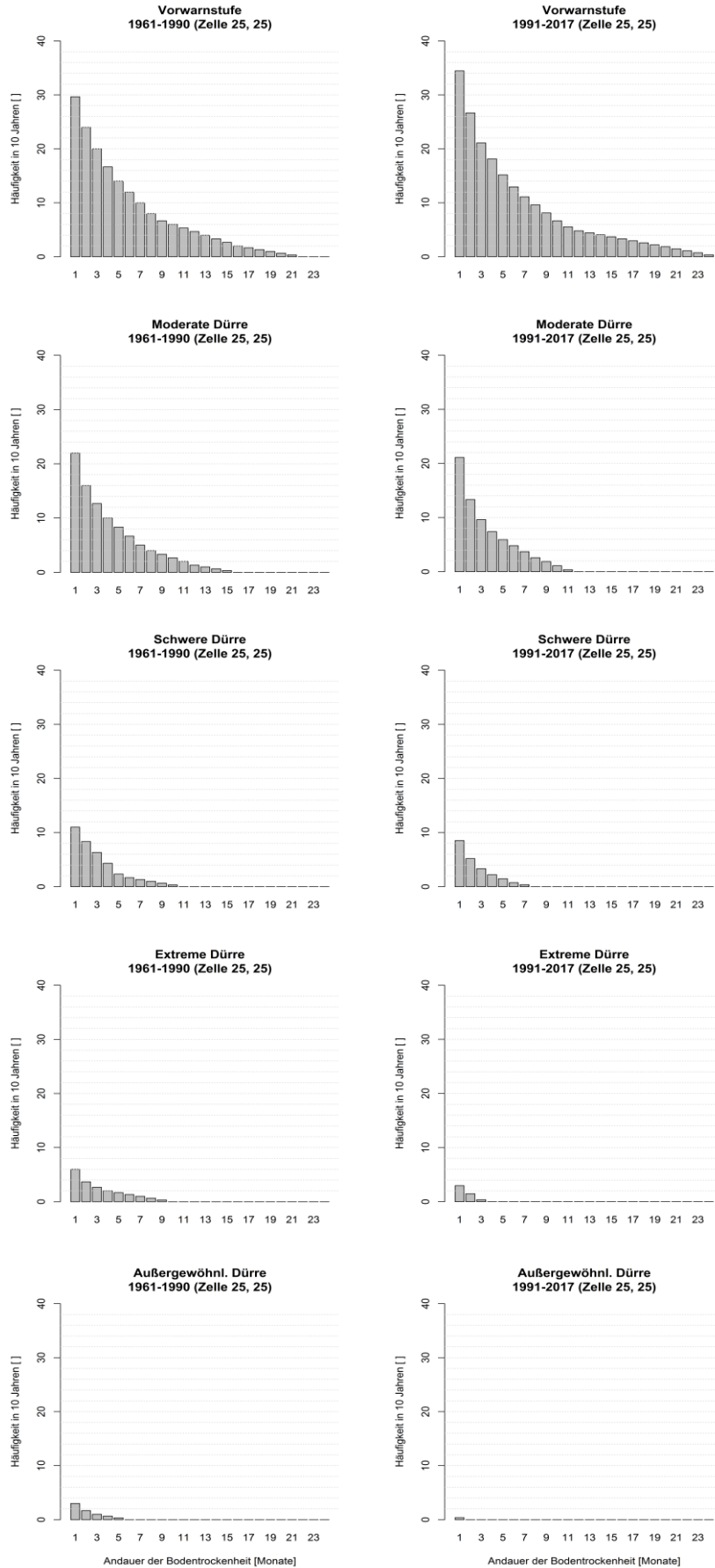
Anlage 8: Monatliche Korrelationskoeffizienten (Spearman-Rangkorrelationskoeffizient) zwischen dem SPI (links) bzw. dem SPEI (rechts) jeweils auf Wirkungszeitskalen zwischen 1 und 48 Monaten für die Häufigkeit verschiedener Eichenraßgesellschaften (Eichenwickler, Frostspanner, Goldäfter, Eichenmehlthau); Zeitraum: 1971-2014 (Goldäfter nur bis 1999).



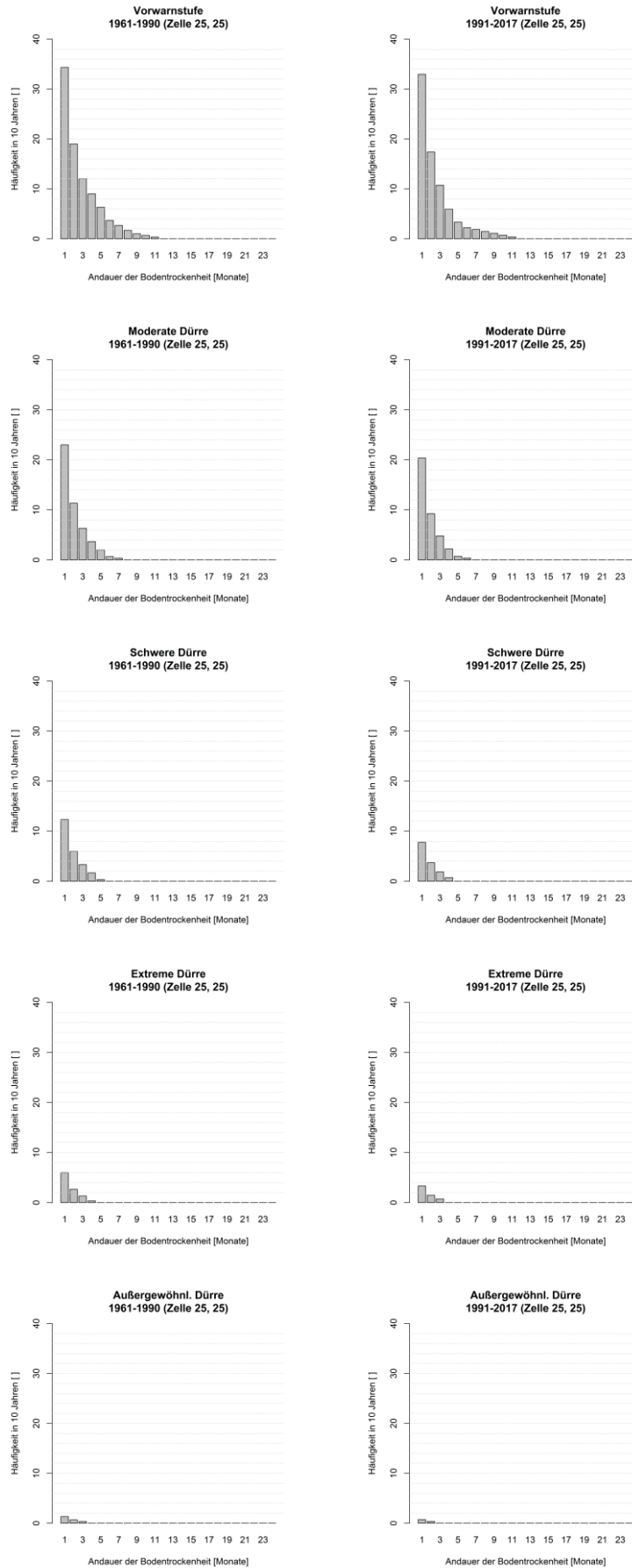
Anlage 9: Korrelation des SSI-1 mit dem SPEI auf sechs verschiedenen Zeitskalen und für Verschiebungen zwischen den beiden Zeitreihen zwischen -24 bis +24 Monaten dargestellt für das EZG der Elbe sowie zwei unterschiedlich Zufluss-EZG; Zeitraum: 1961–2010.



Anlage 10: Andauer von Bodentrockenheit verschiedener Andauern für die fünf SMI-Klassen und zwei Vergleichszeiträume im Gesamtboden



Anlage 11: Andauer von Bodentrockenheit verschiedener Andauern für die fünf SMI-Klassen und zwei Vergleichszeiträume im Oberboden



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.lfulg.sachsen.de

Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des
Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft.

Autoren:

Thomas Pluntke, Dr. Rico Kronenberg, Dr. Stephanie Hänzel, Dominic Rumpf,
Dr. Frank Zimmermann*, Prof. Jörg Matschullat*, Prof. Christian Bernhofer
TU Dresden, Professur für Meteorologie, Piener Straße 23, 01737 Tharandt

* TU Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum

Telefon: + 49 351 463-31340

Telefax: + 49 351 463-31302

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 2612-5101

Telefax: + 49 351 2612-5199

E-Mail: johannes.franke@smul.sachsen.de

Fotos:

U. Moderow, T. Pluntke, F. Grunicke (alle Titelseite)

Redaktionsschluss:

28.02.2020

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 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.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de