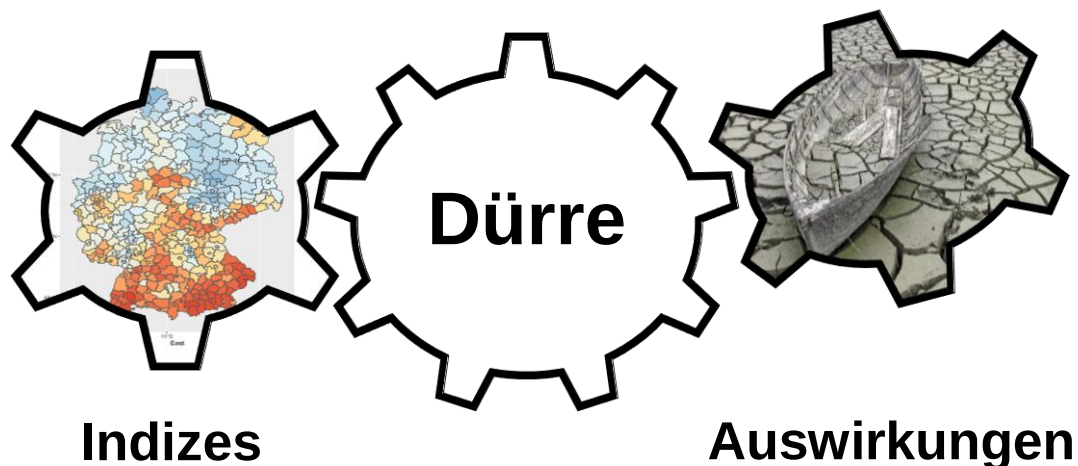


Gefahr von Dürre in Deutschland

Eine kombinierte Analyse von Dürreindizes und Dürreauswirkungen



Masterarbeit von
Alina Herber

unter Leitung von Prof. Dr. K. Stahl, Dr. V. Blauhut und Dr. A. Marx
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Freiburg i. Br., Dezember 2017

Professur für Umwelthydrosysteme
Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

in Kooperation mit dem
Department für Hydrosystemmodellierung
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig

Gefahr von Dürre in Deutschland

Eine kombinierte Analyse von Dürreindizes und Dürreauswirkungen

Masterarbeit von
Alina Herber
Matrikelnummer 3311631

Referentin: Prof. Dr. K. Stahl
Korreferent: Dr. V. Blauhut
Betreuer: Dr. A. Marx

Freiburg im Breisgau, Dezember 2017

I Inhaltsverzeichnis

I Inhaltsverzeichnis.....	I
II Abbildungsverzeichnis.....	III
III Tabellenverzeichnis.....	VII
IV Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Zusammenfassung.....	XI
Extended English Summary.....	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Das Naturphänomen Dürre.....	1
1.2 Dürreindizes und der Deutsche Dürremonitor.....	3
1.3 Dürreauswirkungen und die EDII.....	7
2 Problemstellung und Zielsetzung.....	11
3 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage.....	15
3.1 Klima, Geologie, Böden und Landnutzung in Deutschland.....	15
3.2 Datengrundlage des Deutschen Dürremonitors.....	18
3.3 Datengrundlage der EDII.....	20
4 Methodik.....	27
4.1 Skalierung der Dürreauswirkungsdaten.....	27
4.2 Autokorrelationsanalyse der Dürreindizexdaten.....	27
4.3 Korrelationsanalyse.....	28
4.4 Boxplotanalyse.....	31
4.5 ROC-Analyse.....	32
5 Ergebnisse.....	35
5.1 Zeitliche und räumliche Autokorrelation der Dürreindizes.....	35
5.2 Zusammenhang von Dürreindizes und -auswirkungen.....	37
5.2.1 Beziehung zwischen Trockenheit und der Anzahl an Dürreauswirkungen der Land- und Viehwirtschaft I_{LVW}	37
5.2.2 Beziehung zwischen Trockenheit und der Anzahl an auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R	45

I Inhaltsverzeichnis

5.2.3 Beziehung zwischen Trockenheit und dem Auftreten von Dürreauswirkungen	49
5.3 Schwellenwertanalyse	49
5.4 Leistungsfähigkeit der Dürreindizes	53
5.5 Evaluierung der Ergebnisse.....	56
6 Diskussion	57
7 Schlussfolgerungen	69
Literaturverzeichnis.....	73
Bildquellen	82
Anhang	83
Anhang I.....	83
Anhang II.....	88
Anhang III	94
Anhang IV	99
Ehrenwörtliche Erklärung	101

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der konsekutiven Abfolge verschiedener funktionaler Dürreotypen (orientiert an Stahl (2001)).	3
Abbildung 2: Schema des mesoskaligen Hydrologischen Modells (Samaniego, 2017).	5
Abbildung 3: Mittlerer Jahresniederschlag [mm] für den Referenzzeitraum 1961-1990 (Mühr, 2008).	15
Abbildung 4: Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (verändert nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2015)).	16
Abbildung 5: Bodenarten der Oberböden Deutschlands der Bodenübersichtskarte Maßstab 1:1 000 000 (verändert nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007)).	17
Abbildung 6: Flächenabdeckung der CORINE Landnutzungsklasse a) 2.1.1. nicht bewässertes Ackerland CL und b) den restlichen Klassen der Landwirtschaft 2.2. Dauerkulturen, 2.3 Grünland und 2.4 heterogenen Flächen RLVW aus dem Jahr 2006 (verändert nach Europäische Umweltagentur (2016)).	18
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Abläufe zur Erstellung der in dieser Arbeit betrachteten Dürreindizes auf NUTS 3 Ebene.	19
Abbildung 8: $SMI_{1,8}$ für 07/2003 auf NUTS3 Ebene aggregiert.	19
Abbildung 9: Zeitreihe (von 01/2000 bis 12/2010) der im mHM (Version 5.5) berechneten Dürreindizes für den Landkreis Freiburg im Breisgau aggregiert. In rot der bisher zur Dürreklassifikation angenommene Schwellenwert (hier abgekürzt: Sw) von 0.2.	20
Abbildung 10: Zeitliche Variabilität (von 01/1951 bis 12/2015 pro Monat) der Anzahl von land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen I_{LVW} für alle NUTS Regionen pro Ebene aufsummiert. Zu beachten ist, dass die y-Achsen der Abbildungen a)-d) unterschiedliche Spannweiten haben.	22
Abbildung 11: Kuchendiagramme kategorialer Anteile entsprechend Anhang I Tabelle 7 der berichteten Dürreauswirkungen der Land- und Viehwirtschaft. Zu beachten ist, dass die Größe der Kuchendiagramme für die oberen und unteren Darstellungen variiert.	24
Abbildung 12: Karten der Anzahl an Monaten mit land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen I_{LVW} auf den kleinsten bestimmaren Ebenen (von 01/1951 bis 12/2015). Weiße NUTS Regionen zeigen an, dass keine Dürreauswirkungen in der EDII beschrieben werden.	25
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Schritte der in dieser Arbeit durchgeführten Analyse.	28

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 14: Korrelationsvarianten der Indizes mit Auswirkungen. Oben: Schema der Zuordnung des minimalen SMI über drei Monate; unten: Schema der Zuordnung des SMI zu Dürreauswirkungen bei einem Zeitversatz von einem Monat. 30

Abbildung 15: Beispielhafte Skizze einer ROC. Bei einem Schwellenwert von 18.5 wird der maximale Abstand zur Hauptdiagonalen erreicht; zur Illustration sind zusätzlich die Projektionen eingezeichnet, die sich jeweils für einen niedrigeren (16.5) und einen höheren (20.5) Schwellenwert ergeben würden (entnommen aus Moosbrugger und Kelava, (2012)). 34

Abbildung 16: Zeitliche Autokorrelation des Landkreises Freiburg im Breisgau (DE131) dargestellt anhand des Autokorrelationskoeffizienten (ACF []) gegen den Zeitversatz [Monaten] für die verschiedenen Dürreindizes. 35

Abbildung 17: Karte der NUTS3 eingeteilt in Clustergruppen (vereinheitlicht nummeriert) pro untersuchtem Dürreindex als Ergebnis der Clusteranalyse mit Hilfe der Mclust Funktion (Fraley und Raftery, 2007). 36

Abbildung 18: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und der Anzahl ohne Flächengewichtung skaliert land- und viehwirtschaftlicher Dürreauswirkungen I_{LVW} ohne Minimumoption. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkenntlich. 38

Abbildung 19: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und der Anzahl ohne Flächengewichtung skaliert land- und viehwirtschaftlicher Dürreauswirkungen I_{LVW} mit Minimumoption. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkenntlich. 41

Abbildung 20: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und der Anzahl ohne Flächengewichtung skaliert land- und viehwirtschaftlicher Dürreauswirkungen ausschließlich der CORINE Landnutzungs-kategorie 2.1.1 entsprechend Dürreauswirkungen I_{CL} ohne Minimumoption. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkenntlich. 43

Abbildung 21: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und der Anzahl ohne Flächengewichtung skaliert land- und viehwirtschaftlicher Dürreauswirkungen exklusive der CORINE Landnutzung 2.1.1 entsprechenden Dürreauswirkungen I_{RLVW} ohne Minimumoption. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkenntlich. 44

Abbildung 22: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und der Anzahl ohne Flächengewichtung skaliert auf Abflussmengen bezogener Dürreauswirkungen I_R ohne Minimumoption.

Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkenntlich. 46

Abbildung 23: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und der Anzahl ohne Flächengewichtung skaliierter auf Abflussmengen bezogener Dürreauswirkungen I_R mit Minimumoption. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkenntlich. 47

Abbildung 24: Mittlere Mediane der Boxplotanalyse der NUTS3 (mit signifikantem Korrelationszusammenhang) pro Cluster bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Auswirkungsdaten der Land- und Viehwirtschaft I_{LVW} . Beschriftung entspricht jeweils dem ersten und zweiten Quartil bzw. der Cluster Nummerierung. 51

Abbildung 25: Mittlere Mediane der Boxplotanalyse der NUTS3 (mit signifikantem Korrelationszusammenhang) pro Cluster bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Auswirkungsdaten der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R . Beschriftung entspricht jeweils dem ersten und zweiten Quartil bzw. der Cluster Nummerierung. 52

Abbildung 26: ROC-Kurven für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang bei Nutzung der ohne Flächengewichtung herunterskalierten I_{LVW} . Mittlerer idealer Schwellenwert, mittlere AUC-Werte sowie mittlere Sensitivität und Spezifität für alle NUTS3 (mit signifikantem Korrelationszusammenhang) in rot markiert. 54

Abbildung 27: ROC-Kurven für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang bei Nutzung der ohne Flächengewichtung herunterskalierten I_R . Mittlerer idealer Schwellenwert, mittlere AUC-Werte sowie mittlere Sensitivität und Spezifität für alle NUTS3 (mit signifikantem Korrelationszusammenhang) in rot markiert. 54

Abbildung 28: mittlere Lufttemperatur im Jahr [°C] für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach Mühr (2008). 88

Abbildung 29: zeitliche Variabilität der Anzahl von auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen (I_R) zu vieh- und landwirtschaftlichen Dürreauswirkungen (I_{LVW}) von Januar 1951 bis Dezember 2015 pro Monat für das gesamte deutsche Gebiet aufsummiert. Zu beachten ist, dass die y-Achsen der Abbildungen a)-d) unterschiedliche Spannweiten haben. 91

Abbildung 30: Kuchendiagramme der Anteile der berichteten Dürreauswirkungen einzelner Kategorien entsprechend Anhang I Tabelle 7 an den gesamten auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen. Größe je nach Anzahl an Auswirkungen auf den kleinsten bestimmaren räumlichen Ebenen. 92

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 31: Darstellung der Anzahl an Monaten der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R auf den kleinsten bestimmbarsten Ebenen (von Januar 1951 bis Dezember 2015). Weiße NUTS Regionen zeigen an, dass keine Dürreauswirkungen in der EDII beschrieben werden. 93

Abbildung 32: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und dem Auftreten der skalierten land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen I_{LVW} ohne Minimumoption. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkenntlich. 94

Abbildung 33: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und dem Auftreten der skalierten auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R ohne Minimumoption. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkenntlich. 95

Abbildung 34: Cluster und indexspezifische Boxplots sowie die 95% Konfidenzintervalle der Mediane für die Verteilungen der Dürreindizes in Monaten mit Auftreten von Dürreauswirkungen bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Auswirkungsdaten der Land- und Viehwirtschaft I_{LVW} . 96

Abbildung 35: Cluster und indexspezifische Boxplots sowie die 95% Konfidenzintervalle der Mediane für die Verteilungen der Dürreindizes in Monaten mit Auftreten von Dürreauswirkungen bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Auswirkungsdaten der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R . 97

Abbildung 36: ROC-Kurven für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang bei Nutzung der ohne Flächengewichtung NUTS3 Originaldaten der Land- und Viehwirtschaft I_{LVW} . Mittlerer idealer Schwellenwert, mittlere AUC-Werte sowie mittlere Sensitivität und Spezifität für Gesamtdeutschland in rot markiert. 98

Abbildung 37: ROC-Kurven für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang bei Nutzung der ohne Flächengewichtung NUTS3 Originaldaten der Land- und Viehwirtschaft I_R . Mittlerer idealer Schwellenwert, mittlere AUC-Werte sowie mittlere Sensitivität und Spezifität für Gesamtdeutschland in rot markiert. 98

Abbildung 38: Bewertung der Schwere von Dürreereignissen anhand von Flächenausdehnung, Länge und Intensität der Dürreereignisse laut SMI mit Referenzperiode vom 01/1954 bis 10/2015 von Zink et al. (2016). 99

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikation der SMI Werte nach Marx et al. (2016).	7
Tabelle 2: Schematische Darstellung der Fehlerarten und ihrer Wahrscheinlichkeiten (nach Moosbrugger und Kelava (2012)).	33
Tabelle 3: Deutschlandweite, indexunspezifische mittlere Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Zuordnungsvarianten entsprechend Kapitel „4.3 Korrelationsanalyse“ zwischen Dürreauswirkungen der verschiedenen Auswirkungsbereiche und den Dürreindizes $SMI_{1,8}$, $SMI_{0,25}$, $SPEI_a$ und $SPEI_p$.	39
Tabelle 4: Aus der Boxplotanalyse entstammende Mediane für die einzelnen Indizes ($SMI_{1,8}$, $SMI_{0,25}$, $SPEI_a$, $SPEI_p$), Auswirkungsbereiche (I_{LVW} , I_R) und zugrunde liegende Daten (skalierte Auswirkungsdaten, NUTS3 Originaldaten) bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Daten.	50
Tabelle 5: Aus der ROC-Kurven entstammende mögliche neue Schwellenwerte bei Zuordnung der Dürreauswirkungen zu Dürreindizes über die clusterspezifischen Zeitversätze aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption für herunterskalierte Auswirkungsdaten.	55
Tabelle 6: Für die verschiedenen Dürreindizes des Deutschen Dürremonitors ermittelten Fehler 1. und 2. Art für die sektorspezifische Anwendung der verschiedenen deutschlandweiten Schwellenwerte auf alle NUTS3 Deutschlands zur Beurteilung des Auftretens der herunterskalierten Dürreauswirkungen der EDII.	56
Tabelle 7: Übersicht der Klassifikation von Auswirkungssektoren und jeweiligen Kategorien sowie in dieser Arbeit betrachteten Auswirkungsbereichen (übersetzt und verändert mit Blauhut nach Stahl et al. (2012)).	83
Tabelle 8: Bodenfläche pro Bundesland in km^2 (einschließlich des gemeinschaftlichen deutsch-luxemburgischen Hoheitsgebietes) sowie jeweiliger Anteil der Landnutzung pro Bundesland in % (verändert nach Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2015a).	89
Tabelle 9: Unterteilung der CORINE Landnutzungsklassen der Landwirtschaft (Keil et al., 2011). In grau hinterlegte Kategorien kommen in Deutschland nicht vor.	90

IV Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung und Einheit
α	Fehler 1. Art; Fehlalarmquote kriteriumsorientierter Klassifikation [] bzw. [%]
ACF	Autokorrelationskoeffizient []
β	Fehler 2. Art; Verpasserquote kriteriumsorientierter Klassifikation [] bzw. [%]
CL	CORINE Landnutzungsklasse 2.1.1 „nicht bewässertes Ackerland“
EC	Europäische Kommission (Engl.: European Commission)
EDII	Europäische Datenbank von Dürrewirkungsberichten (Engl.: European Drought Impact report Inventory)
EEA	Europäische Umweltagentur (Engl.: European Environment Agency)
f	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Bodenfeuchtefraktion []
FN	Anzahl Falsch-Negativer Entscheidungen bei kriteriumsorientierter Klassifikation []
FP	Anzahl Falsch-Positiver Entscheidung bei kriteriumsorientierter Klassifikation []
h	Bandbreite []
I	Auswirkung (Engl. : Impact)
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change)
K	Kerndichteschätzer []
l	Wurzelzonenschichttiefe [mm]
LVW	Land- und Viehwirtschaft
mHM	Mesoskalige Hydrologische Model
n	Stichprobenumfang []
NUTS	Statistische Nomenklatur territorialer Einheiten (Frz. : Nomenclature des unités territoriales statistiques)
p	Signifikanz eines Hypothesentests (Engl. : p-value)
R	Abflussmengen Bezug (Engl.: Runoff)
r	Spearman Rangkorrelationskoeffizient auf NUTS3 Ebene []
$\bar{R}$	Mittlerer Spearman Rangkorrelationskoeffizient auf Clusterebene bei Betrachtung aller signifikanten Zusammenhänge der im Cluster liegenden NUTS3
RLVW	Land- und Viehwirtschaft exklusive der CORINE Landnutzungsklasse 2.1.1 „nicht bewässertes Ackerland“
RN	Anzahl richtig-negativer Entscheidung bei kriteriumsorientierter Klassifikation []
RP	Anzahl richtig-positiver Entscheidung bei kriteriumsorientierter Klassifikation []
s	Porosität bzw. gesättigter Wassergehalt [mm]
$SMI_{0.25}$	Monatlicher standardisierter Bodenfeuchteindex des Oberbodens (bis in 25 cm Tiefe) (Engl.: Soil Moisture Index)
$SMI_{1.8}$	Monatlicher standardisierter Bodenfeuchteindex des Gesamtbodens (bis in 1.8 m im deutschen Mittel) (Engl.: Soil Moisture Index)

SPEI _a	Monatlicher standardisierter Niederschlags-Evapotranspirationsindex unter Betrachtung der aktuellen Evapotranspiration (Engl.: Standardized Precipitation actual Evapotranspiration Index)
SPEI _p	Monatlicher standardisierter Niederschlags-Evapotranspirationsindex unter Betrachtung der potentiellen Evapotranspiration (Engl.: Standardized Precipitation potential Evapotranspiration Index)
Sw	Schwellenwert zur Klassifikation von Dürre anhand Dürreindizes
u	Integrationskonstante []
UFZ	Umweltforschungszentrum
X	monatliche absolute Bodenfeuchte [mm]

Zusammenfassung

Dürren zählen in Deutschland zu den verlustreichsten Naturkatastrophen und verursachen eine Vielzahl an negativen, direkten und indirekten Auswirkungen auf sozio-ökonomische und ökologische Sektoren. Zum Erlangen eines tiefergreifenden Verständnisses über die Dürreursachen und -folgen ist ein Monitoring und Erforschen von Dürreindizes sowie der Auswirkungen in Deutschland unerlässlich. Der Deutsche Dürremonitor stellt u.a. täglich aktuell den Bodenfeuchteindex SMI in einer Auflösung von $4 \times 4 \text{ km}^2$ über zwei Bodentiefen zur Verfügung. Die European Drought Impact Report Inventory beherbergt eine Sammlung kategorisierter Berichte zu Dürreauswirkungen auf verschiedenen administrativen Ebenen. Durch die Kombination der historischen Daten dieser Informationsquellen können sektorspezifische Schwellenwerte zum Auftreten von Dürreauswirkungen bestimmt werden. In dieser Arbeit wurden verschiedene Methoden zur Bewertung des Zusammenhangs zwischen Dürreindizes und Wirkungsberichten untersucht. Dabei konnten Zusammenhänge zwischen den Monitoring Variablen und Auswirkungen auf die Land- und Viehwirtschaft, sowie auch auf Abflussmengen bezogene Auswirkungen demonstriert werden. Insbesondere wurde dabei die unterschiedliche Eignung der Indizes für Gesamt- und Oberboden sowie der Wasserbilanzindizes mit potentieller und aktueller Verdunstung verglichen. Die Analyse zeigt ein Nord-Süd-Gefälle mit tendenziell stärkeren Korrelationszusammenhängen in den südlichen Regionen Deutschlands. Bei differenzierten Untersuchungen der land- und viehwirtschaftlichen Auswirkungen nach Landnutzungsklassen konnte ein mehrmonatiger Zeitversatz zwischen den Dürresignalen der Indizes und dem Auftreten der Auswirkungen für Dauerkulturen, Grünland und heterogene landwirtschaftliche Flächen quantifiziert werden. Im Vergleich von Bodenfeuchtevariablen mit Niederschlag und Verdunstung hat sich eine bessere Eignung der Bodenfeuchte als Zeiger für berichtete Dürreauswirkungen erwiesen. Weiter konnte veranschaulicht werden, dass der bisher im Deutschen Dürremonitor angewandte Schwellenwert zur Klassifikation von Dürre eher zu niedrig gewählt ist. Idealerweise sollte ein sektor-, index- und regionalspezifischer Schwellenwert genutzt werden.

Schlagerworte: European Drought Impact Report Inventory (EDII), Landwirtschaftliche Dürre, Hydrologische Dürre, Deutscher Dürremonitor, Bodenfeuchteindex (SMI), Standardisierter Niederschlags-Evapotranspirations Index (SPEI), Schwellenwert, Korrelation, Boxplot, Grenzwertoptimierungskurven.

Extended English Summary

Droughts are one of the most costly hazards and have a direct or indirect impact on socio-economical and ecological sectors. In order to investigate their causing processes and consequences, drought monitoring and impact research is vital for hazard management strategies. The German Drought Monitor publishes the actual Soil Moisture Index (SMI) in a resolution of $4 \times 4 \text{ km}^2$ for two soil layers every day. The European Drought Impact Report Inventory collects categorical reports about the impact of drought on different administrative levels. Applying this historic information, sector specific thresholds for drought impact occurrences can be estimated. In this work, different methods were used to evaluate the link between drought indices and their impact. This study demonstrates the connection between selected monitoring variables and the agricultural impact as well as the runoff related impact. It further compares the performance of Soil Moisture Indices for all soil layers and the upper soil layer to the performance of water balance indices with potential and actual evapotranspiration. The analysis shows a North-South gradient with tendencies of higher correlation strength in the Southern parts of Germany. Examining the connection to the agricultural impact which is differentiated by land cover class showed a time lag of several months between the drought index signal and the occurrence of impact of permanent crops, pastures, and heterogeneous agricultural areas. Furthermore, this paper illustrates that the actual threshold for drought classification of the German Drought Monitor is rather low. A sector-, index- and region-specific threshold is recommended.

Keywords: European Drought Impact Report Inventory (EDII), Agricultural Drought, Hydrological Drought, German Drought Monitor, Soil Moisture Index (SMI), Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI), Threshold, Correlation, Boxplot, Receiver Operating Curves.

1 Einleitung

1.1 Das Naturphänomen Dürre

Dürren sind komplexe, natürliche Phänomene (Dracup, 1991; van Loon, 2015; Wilhite und Glantz, 1985). Sie entwickeln sich häufig langsam und weisen keinen eindeutigen Beginn oder Ende auf (Lloyd-Hughes, 2014; Tannehill, Ivan, Ray, 1947; Wilhite, 2000). Daher werden Dürren als „creeping disaster“ (Dt.: „kriechende Katastrophen“) bezeichnet (Mishra und Singh, 2010; Wilhite, 2000). Dürren treten in allen Klimaten auf (Dracup, 1991; Mishra und Singh, 2010). Oftmals sind sie länger anhaltend sowie räumlich großflächiger ausgeprägt (bis zu nationaler oder kontinentaler Ausdehnung möglich) als die Auftrettscharakteristika anderer Naturkatastrophen wie z.B. Stürme oder Überflutungen (Samaniego et al., 2013; Sheffield und Wood, 2011; Wilhite, 2000).

Im deutschen Sprachgebrauch wird grundsätzlich zwischen Trockenheit und Dürre unterschieden, wobei Dürre ein auswirkungsbezogener Begriff ist (Bernhofer et al., 2015). Es wird also erst dann von Dürre bzw. einem Dürreereignis oder Dürreperiode gesprochen, wenn Auswirkungen auf sozio-ökonomische und/oder ökologische Sektoren auftreten. Laut der EM-DAT-Datenbank litten weltweit zwischen 1950 und 2014 rund 2.2 Milliarden Menschen unter Dürre (Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)). Die Federal Emergency Management Agency bestätigt, dass Dürren zu den kostspieligsten Katastrophen zählen (Federal Emergency Management Agency, 1995; Svoboda et al., 2002). Selbst wohlhabende Gesellschaften wie Deutschland sind von Dürre betroffen (Bachmair et al., 2016a; Marx et al., 2016; Stahl et al., 2016). Im Jahr 2003 gab es allein in Deutschland 7 000 zusätzliche Todesfälle und auf europäischer Ebene waren es schätzungsweise 70 000 Todesopfer aufgrund von Dürre (Robine et al., 2008). Darüber hinaus betrug der von Dürre verursachte Schaden im landwirtschaftlichen Sektor im Jahr 2003 für Deutschland insgesamt 1.5 Milliarden Euro (García-Herrera et al., 2010). Neben dem landwirtschaftlichen Sektor sind in Deutschland auch viele weitere Sektoren von Dürre betroffen (Stahl et al., 2016). Aufgrund von Niedrigwasser im Jahr 2003 konnte die Binnenschifffahrt beispielsweise gar nicht oder nur mit reduzierter Ladung verkehren und erlitt finanzielle Einbußen im mehrstelligen Millionen Euro Bereich (Reim, 2005).

Weiter wird im Sprachgebrauch zwischen Dürreindikatoren und Dürreindizes unterschieden. Dürreindikatoren sind Variablen, die das Wasserdefizit eines Systems beschreiben (z.B. Niederschlagssummen, Wasserstände in Oberflächengewässern und Reservoirs, absolute Bodenfeuchte, Grundwasserstände etc.) (Bernhofer et al., 2015). Diese Dürreindikatoren werden oftmals im Vergleich zu Normalbedingungen, also einem mittleren Langzeitzustand (des Niederschlags, der Bodenfeuchte, von Wasserständen etc.) betrachtet. Dann spricht man von Dürreindizes, die eine Trockenheitsanomalie quantifizieren (Bernhofer et al., 2015; Sheffield und Wood, 2011; Svoboda et al., 2002; van Loon, 2015; Wilhite und Glantz, 1985). Diese Anomalie wird häufig anhand von

1 Einleitung

Perzentilen quantifiziert (Alderlieste und van Lanen, 2013; Bachmair et al., 2016a; Bernhofer et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2010; Zink et al., 2016).

Für das Naturphänomen Dürre gibt es bisher keine einheitliche Definition (Bernhofer et al., 2015; Lloyd-Hughes, 2014; van Loon, 2015; Wilhite, 2000; Wilhite und Glantz, 1985). Im Zuge von funktionalen Dürredefinitionen wird zwischen vier Dürretypen unterschieden, die jeweils durch vielfältige Faktoren beeinflusst werden, verschiedene Sektoren betreffen und zeitlich verschiedene Auftrittssignale aufweisen (Bernhofer et al., 2015; Keyantash und Dracup, 2002; Marx et al., 2016; Mishra und Singh, 2010; Stahl et al., 2016; Svoboda et al., 2002; Wilhite und Glantz, 1985): Die **meteorologische Dürre** wird als Niederschlagsanomalie definiert und ist zeitlich gesehen das erste Dürresignal. Als Index für meteorologische Dürre werden häufig standardisierte Niederschlagsindizes genutzt. Die zweite Art der Dürre ist die **landwirtschaftliche Dürre**, die ein Wasserdefizit in der Wurzelzone des Bodens, also einen Mangel des pflanzenverfügbaren Wassers darstellt. Sie wird häufig durch Bodenfeuchteindizes beschrieben. Als dritte Art der Dürre wird die **hydrologische Dürre** benannt. Diese bezeichnet einen Wassermangel in Oberflächengewässern und Reservoirs, der sich mit dem Fortschreiten des Dürreereignisses bis in die Grundwasserspeicher und den Basisabfluss auswirken kann. Schließlich wird die **sozio-ökonomische Dürre** für die Fälle definiert, in denen nicht genügend Wasser für die bestehende Nachfrage durch menschliche Aktivität zur Verfügung steht (Bernhofer et al., 2015; Keyantash und Dracup, 2002; Marx et al., 2016; Mishra und Singh, 2010; Stahl et al., 2016; Svoboda et al., 2002).

Das Konzept der Dürreausbreitung (schematisiert in Abbildung 1) nimmt an, dass meteorologische Dürre die landwirtschaftliche Dürre und hydrologische Dürre als zeitlich nachfolgende Konsequenz bedingen kann (Mishra und Singh, 2010; Stahl, 2001; van Loon et al., 2011; van Loon, 2015). Dürreereignisse werden in der Regel von bestimmten meteorologischen Bedingungen wie beispielsweise Antizyklone verursacht. Diese sind meist neben geringen Niederschlägen mit erhöhten Temperaturen und somit hohen Verdunstungsraten verbunden. Beides reduziert den Wassergehalt der Böden. Beim Auftreten trockener Böden in der Wachstumsphase der Pflanzen kann eine landwirtschaftliche Dürre verursacht werden (Stahl, 2001; van Loon, 2015). Geringer Niederschlag und trockene Böden wiederum reduzieren den Abfluss der Oberflächengewässer und die Grundwasserneubildung. So kann, je nach Vorbedingungen, mit einem zeitlichen Versatz zur meteorologischen und landwirtschaftlichen Dürre eine hydrologische Dürre nachfolgen. Die sozio-ökonomische Dürre kann aus allen vorher genannten funktionalen Dürretypen resultieren (Stahl, 2001; van Loon, 2015). In manchen Fällen wird der Begriff der Dürreausbreitung für den räumlichen Ausbreitungsweg von Dürreereignisse genutzt (Zampieri et al., 2009). In dieser Arbeit wird der Begriff der Dürreausbreitung entsprechend der Definition von van Loon (2015) ausnahmslos für die Translation der Anomalien meteorologischer Bedingungen über landwirtschaftlicher zu hydrologischer Dürre genutzt. Bei der Ausbreitung des Dürresignals über den hydrologischen Kreislauf kann es sowohl zu einem Zeitversatz des Dürresignales als auch zu einer Abmilderung der Dürreintensität kommen. Weiter nimmt die Länge des

Dürresignals von meteorologischer, zu landwirtschaftlicher und hydrologischer Dürre häufig zu (Eltahir und Yeh, 1999; Peters et al., 2003; van Loon et al., 2011). Van Loon (2015) weist darauf hin, dass die Prozesse der Dürreausbreitung komplex sind und unter anderem von den Eigenschaften der Einzugsgebiete (wie z.B. Einzugsgebietsgröße, Vorfeuchte, etc.) und dem vorherrschendem Klima abhängen.



Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der konsekutiven Abfolge verschiedener funktionaler Dürreotypen (orientiert an Stahl (2001)).

Aus den bisherigen Ausführungen kann man entnehmen, dass Dürre ein nicht einheitlich definierbares, komplexes Naturphänomen ist, dessen Auswirkungen für Mensch und Umwelt von großer Bedeutung sind. Das Beobachten von physikalischen Dürreindizes einerseits sowie von Dürreauswirkungen andererseits und Kenntnisse darüber, wie diese miteinander in Verbindung stehen, sind daher für ein erfolgreiches Dürremanagement unerlässlich (Pedro-Monzonís et al., 2015; Stagge et al., 2015a; Stahl et al., 2012). Im Folgenden wird nun näher auf beide Größen, die physikalischen Dürreindizes und Dürreauswirkungen sowie entsprechende Monitoring Systeme eingegangen.

1.2 Dürreindizes und der Deutsche Dürremonitor

Dürreindizes ermöglichen die Quantifizierung von Dürreintensitäten, Dauer und Schwere. Somit können Dürreereignisse verschiedener Regionen und Zeitpunkten verglichen werden (Mishra und Singh, 2010; Tallaksen et al., 2009; Wilhite, 2000). Anhand von Dürreindizes wird Dürre oft bei Unterschreiten eines gewählten Schwellenwertes definiert. Dieses Prinzip nennt sich Schwellenwertmethode (Dracup et al., 1980; Hisdal et al., 2004; van Loon, 2015; Yevjevich, 1967). Die Wahl des Schwellenwertes ist laut Mishra und Singh (2010) fundamental. Es existiert eine Vielzahl von Dürreindizes, die verschiedene Prozesse, Standardisierungen und Dürredefinitionen betrachten (Bachmair et al., 2016a; Bernhofer et al., 2015). Dabei ist die Wahl des Dürreindex davon abhängig, welcher funktionale Dürreotyp betrachtet werden soll (hydrologische, meteorologische, landwirtschaftliche oder soziökonomische Dürre) und wer der Anwender ist (Landwirte, Wasserwirtschaftler etc.)

1 Einleitung

(Bachmair et al., 2016a). Bei der Wahl des Dürreindex spielt für die Anwender besonders die einfache Interpretationsmöglichkeit eine entscheidende Rolle (Bachmair et al., 2016a). Ein häufig verwendeter meteorologischer Dürreindex ist der standardisierte Niederschlags-Evapotranspirationsindex (engl.: Standardized Precipitation potential Evapotranspirations Index; ab hier: SPEI_p) nach Vicente-Serrano et al. (2010) als Weiterentwicklung des standardisierten Niederschlagsindex (engl.: Standardized Precipitation Index, ab hier: SPI) nach McKee et al. (1993). Der SPEI_p berücksichtigt neben der Wasserverfügbarkeit in Form des gefallen Niederschlages die potentiellen Wasserverluste durch Verdunstung und Transpiration. Im Vergleich der beiden Niederschlagsindizes spiegelt besonders der SPEI_p in Sommermonaten bei hohen Temperaturen treffender den Zusammenhang zu Dürreauswirkungen wider als der SPI und zeigt keine Probleme in der Berechnung in Monaten ohne Niederschlag (Beguería et al., 2014; Labudová et al., 2017; Vicente-Serrano et al., 2012). Der SPEI_p wird beispielsweise im SPEI Globalen Dürre Monitor (engl.: Global Drought Monitor) genutzt (Beguería et al., 2014).

Weltweit gibt es weitere Dürremonitore, die sich durch unterschiedliche Eingabedaten, räumliche und zeitliche Auflösung sowie den genutzten Dürreindex unterscheiden (Bachmair et al., 2016a; Bernhofer et al., 2015). Der „GIDMaPS“ ist ein weiteres Beispiel für einen globalen Dürremonitor (Beguería et al., 2014; Hao et al., 2014). Kontinentale Dürremonitore sind beispielsweise für Nordamerika (Lawrimore et al., 2002) und Afrika (Sheffield et al., 2014) verfügbar. Für Europa entwickelt die Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission einen europaweiten Dürremonitor (Horion et al., 2012). Nationale Dürremonitore sind beispielsweise für Indien (Shah & Mishra 2015), Tschechien (Trnka et al., 2014) und für die Vereinigten Staaten von Amerika (Svoboda et al., 2002) vorhanden. Seit 2014 gibt es für Deutschland mit der Veröffentlichung des „Deutschen Dürremonitors“ ein hochaufgelöstes Dürremonitoring (Marx et al., 2016; Zink et al., 2016). Das Mitteldeutsche Klimabüro hatte bei der Zusammenarbeit mit regionalen Akteuren den Bedarf eines nationalen, hochaufgelösten Dürremonitors festgestellt. Dieser Forderung folgend war es Ziel, leicht verständliche Informationen möglichst in Echtzeit und einfach für die Öffentlichkeit zugänglich zu machen (Zink et al., 2016). So wurde der Deutsche Dürremonitor entwickelt, der die Bodenfeuchte anhand von Beobachtungen der meteorologischen Stationsdaten des Deutschen Wetter Dienstes (ab hier: DWD) modelliert und anschließend standardisiert.

Die historischen meteorologischen Daten des DWD sind seit 1950 in guter Qualität und in hoher räumlicher Auflösung verfügbar. Die täglichen Wetterdaten werden jeweils im Klimadatenzentrum des DWD abgerufen und nochmals einer Qualitätskontrolle und Plausibilisierung unterzogen. Da die Veröffentlichung der Daten des DWD mit einer Verzögerung von nur 4 Tagen geschieht, kann der Deutsche Dürremonitor entsprechend nahezu in Echtzeit Informationen liefern (Marx et al., 2016; Samaniego et al., 2013; Zink et al., 2016). Nach dieser Datenabfrage werden im Weiteren die Niederschlags- und Lufttemperaturdaten (Tagesminimum, -maximum und Tagesdurchschnitt) mittels Kriging Verfahren mit einem Höhenmodell als externe Gewichtungsfaktor, auf ein 4×4 km Gitter

interpoliert und für jede Gitterzelle die entsprechenden Verdunstungswerte berechnet (Samaniego et al., 2013; Zink et al., 2016).

Anhand von den genannten meteorologischen Daten wird das mesoskalige Hydrologische Modell (ab hier: mHM) betrieben. Das mHM ist ein prozessbasiertes, räumlich verteiltes Modell, welches vom Helmholtzzentrum für Umweltforschung (UFZ Leipzig) entwickelt wurde. Das Modell wurde bereits auf verschiedenen Skalen (4-530 000 km²) in verschiedenen Klimaten (Einzugsgebiete in Europa, USA, Indien) angewendet und evaluiert (Kumar et al., 2013; Marx et al., 2016; Samaniego et al., 2010; Samaniego et al., 2013). Als Eingangsdaten werden die im Folgenden aufgelisteten morphologischen, physiographischen sowie hydrologischen Daten genutzt (Samaniego et al., 2013):

- digitales Höhenmodell (Gitterweite 50x50 m²) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie,
- vektorisierte Bodenkarte mit Informationen über Bodentextur und Hydrogeologie (Maßstab 1:1 000 000) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe;
- Veränderungen der Landnutzung anhand der digitalen CORINE Landnutzungskarte der Jahre 1990, 2000 und 2006 der europäischen Umweltagentur (<http://www.eea.europa.eu>) - Zustände der Landnutzung vor 1990 wurden anhand der Situation 1990 abgeleitet,
- monatliche Variabilität des Blattflächenindex für jede Landnutzung geschätzt anhand der MODIS Daten aus den Jahren 2001-2009 der NASA und der United States Geological Survey,
- Abflusszeitreihen von mehreren Pegelraten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (<http://www.bafg.de>) und des europäischen Netzwerk für experimentelle und repräsentative Flussgebiete (<http://ne-friend.bafg.de>).

Modellierte Prozesse sind beispielsweise Schneeakkumulation, Schneeschmelze, Infiltration, Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung. Der Abfluss wird nach Aggregation mit Muskingum-Cunge Ansatz (Todini, 2007) in Basisabfluss, Direktabfluss und langsamen sowie schnellen Zwischenabfluss für jede Zelle unterschieden (siehe Abbildung 2). Die benötigten Modellparameter werden (unter Verwendung von mehrskaliger Regionalisierung (Kumar et al., 2013; Samaniego et al., 2010) auf niedriger Auflösung von 100×100 m geschätzt und

im Anschluss auf die Zielauflösung von 4×4 km hochskaliert. Die internen Modellschritte werden stündlich berechnet (Zink et al., 2016).

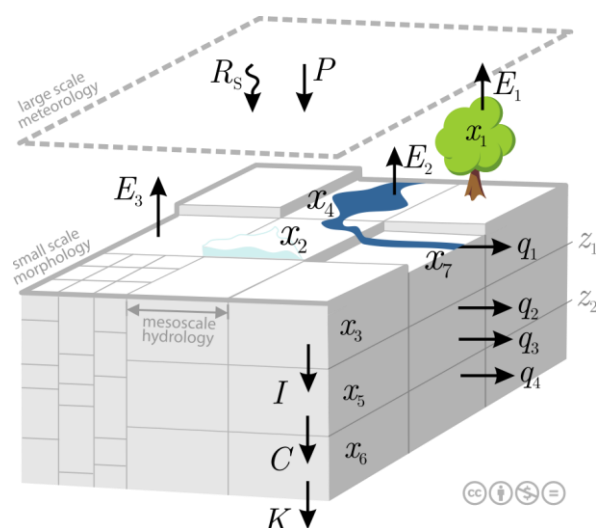


Abbildung 2: Schema des mesoskaligen Hydrologischen Modells (Samaniego, 2017).

1 Einleitung

Als Simulationsergebnis liegen unter anderem Bodenfeuchtwerte in drei Schichten vor. Die ersten zwei Schichten spiegeln die Bodenfeuchte der obersten 5 cm bzw. obersten 25 cm wider. Neben dem Oberboden betrachtet der dritte Wert die Bodenfeuchte über die gesamte Mächtigkeit des Bodens. Diese ist räumlich variabel und von der Bodenart abhängig. Im Mittel liegt die Bodentiefe für Deutschland bei ca. 1.8 m (Marx et al., 2016; Zink et al., 2016). Die im Modell abgeschätzte absolute Bodenfeuchte lässt sich nicht direkt für verschiedene Bodentypen und Klimate vergleichen. Daher muss eine Standardisierung erfolgen, um den Zeitpunkt von Dürreereignissen sowie ihre Länge und Intensität einschätzen zu können (Andreadis et al., 2005).

Bei der Standardisierung erfolgt eine Umrechnung in die Abweichung von Normalbedingungen. Der Bodenfeuchteindex (engl.: Soil Moisture Index; abgekürzt: SMI) ist ein Bodenwasserdefizit relativ zur monatlichen Klimatologie und räumlichen Lage. Der SMI schwankt zwischen 0 und 1 und wird ähnlich wie der SPI nach McKee et al. (1993) anhand einer bedingten kumulativen Verteilung standardisiert (Marx et al., 2016; Samaniego et al., 2013; Zink et al., 2016). Je stärker der Index von 0.5 abweicht, umso extremer weicht die absolute Bodenfeuchte vom Normalzustand, dem langjährigem Mittel, ab. Dabei stehen hohe Indexwerte für statistisch feuchte Bedingungen und kleine Werte für statistisch trockene Bedingungen. Die Standardisierung geschieht in drei Schritten. Zuerst werden die absoluten täglichen Bodenfeuchtwerte aggregiert und normalisiert. Das bedeutet, dass für jede Gitterzelle und jeden Monat die absolute Bodenfeuchte gemittelt und der entsprechende Bodenfeuchteanteil an der maximal möglichen Bodenfeuchte des Bodens berechnet wird (Formel 1).

Formel 1: monatlicher Bodenfeuchteanteil x nach Samaniego et al. (2013).

$$x = \frac{\sum_l x^l}{\sum_l x_S^l}$$

x monatlicher Bodenfeuchteanteil/ –fraktion []

l Wurzelzonenschicht [mm]

x^l monatliche absolute Bodenfeuchte in der Wurzelzonenschicht l [mm]

x_S^l Porosität bzw. gesättigter Wassergehalt der Wurzelzonenschicht l [mm]

Der monatliche Bodenfeuchteanteil kann verschiedene Verteilungsformen abhängig vom Klima und Bodencharakteristika annehmen (Samaniego et al., 2013). Um durch Abschätzung der Verteilung keine zusätzliche Unsicherheitsquelle einzubringen, wird eine nichtparametrische Methode genutzt, um die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $\hat{f}$ der monatlichen Bodenfeuchtefraktion in jeder Zelle zu bestimmen (Formel 2). Für weitere Details, auch zur Auswahl der optimalen Bandbreite, siehe Samaniego et al. (2013).

Formel 2: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Bodenfeuchtefraktion $\hat{f}$ nach Samaniego et al. (2013).

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{k=1}^n K\left(\frac{x - x_k}{h}\right)$$

$\hat{f}(x)$ Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Bodenfeuchtefraktion x

n Stichprobenumfang (Anzahl betrachteter Jahre) []

h Bandbreite []

K glättender Kerndichteschätzer []
 x monatlicher Bodenfeuchteanteil/ –fraktion []

Schließlich kann der Bodenfeuchteindex SMI für jede Zelle und jeden Monat über die Quantile durch Integrieren der Bodenfeuchtefraktion ermittelt werden (Formel 3). Die Ergebnisse der SMI Berechnung werden im Anschluss klassifiziert, in Karten visualisiert und täglich im Internet unter <http://www.ufz.de/duerremonitor/> veröffentlicht.

Formel 3: Berechnung des Bodenfeuchteindex anhand der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach Samaniego et al. (2013).

$$SMI = \int_0^x \hat{f}(u) du$$

SMI Bodenfeuchteindex []
 x monatlicher Bodenfeuchteanteil x []
 $\hat{f}(x)$ Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Bodenfeuchtefraktion x
 u Integrationskonstante []

Die Klassifikation des SMI im Deutschen Dürremonitor beruht auf der Perzentileinteilung

Tabelle 1: Klassifikation der SMI Werte nach Marx et al. (2016).

SMI	Dürreklassifikation
0.21 - 0.30	ungewöhnlich trocken
0.11 - 0.20	moderate Dürre
0.06 - 0.10	schwere Dürre
0.03 - 0.05	extreme Dürre
0.00 - 0.02	außergewöhnliche Dürre

des US Drought Monitors (Svoboda et al., 2002). Dabei wird ab der Unterschreitung des Indexwertes von 0.2 der Beginn einer Dürre definiert (Marx et al., 2016; Samaniego et al., 2013; Svoboda et al., 2002). Das bedeutet, dass die entsprechende absolute Bodenfeuchte nur in 20 % der betrachteten Zeit eingetroffen ist oder unterschritten wird. Liegt der Bodenfeuchteindex zwischen 0.2 und 0.3, wird dies als ungewöhnliche Trockenheit bezeichnet und dient im Deutschen Dürremonitor als Vorwarnstufe von Dürre. Die Dürreintensität wird darüber hinaus anhand des SMI, wie in Tabelle 1 beschrieben, in vier Klassen differenziert (Marx et al., 2016).

1.3 Dürreauswirkungen und die EDII

In der Dürreforschung werden Dürreauswirkungen als „fehlendes Puzzleteil“ beschrieben (Lackstrom et al., 2013; Stahl et al., 2015). Einerseits gibt es nur wenige Projekte, die Dürreauswirkungen strukturiert festhalten, andererseits ist ein direkter Zusammenhang zu Dürreindizes oftmals nur schwer zu erfassen (Ding et al., 2011). Bisherige Datenbanken zu Dürreauswirkungen konzentrieren sich oftmals auf landwirtschaftliche Erträge und finanzielle Auswirkungen (an der Börse, bei Versicherungen oder staatlichen Kompensationszahlungen), die direkt beobachtbar und einfach zu quantifizieren sind (Bachmair et al., 2016a; Bielza Diaz-Caneja et al., 2009; Ding et al., 2011). Landwirtschaftliche Ernteverluste können allerdings auch durch andere Naturphänomene wie Wind, Hagel, Starkregen etc. verursacht werden. Insgesamt sind die Folgen von Dürre weitaus vielfältiger und komplexer als die Betrachtung von Ertragsmengen und können viele verschiedene ökonomische und soziale Lebensbereiche des Menschen und verschiedene Ökosysteme sowohl direkt als auch indirekt beeinflussen (Stahl et al., 2012;

1 Einleitung

Svoboda et al., 2002). Ein erstes Projekt, das nicht nur quantitative sondern zusätzlich qualitative Dürreauswirkungen auf verschiedene Sektoren systematisch festhält, ist der für die USA entwickelte „US Drought Impact Reporter“ (DIR). Für Europa gibt es seit einigen Jahren ein ähnliches Projekt, die „European Drought Impact report Inventory“ (ab hier: EDII), die im Jahr 2012 im Zuge des EU FP-7 Projekt DROUGHT-R&SPI (<http://www.eu-drought.org>) ins Leben gerufen wurde. Die EDII Datenbank ist eine textbasierte Datenbank zu negativen Dürreauswirkungen. In diesem Projekt ist es, neben dem Aufbau der Datenbank durch das Projektteam, für die Öffentlichkeit möglich, Wirkungsberichte im Internet einzutragen. Diese werden anschließend durch Experten kontrolliert, um den Standard der Datenbank zu gewährleisten. Die Datensammlung ist als Bestandsaufnahme historischer Dürreereignisse konzipiert (Stahl et al., 2012; Stahl et al., 2016).

Als Dürreauswirkungen werden negative umwelt-, ökonomische oder soziale Effekte unter Dürrekonditionen gewertet (Bachmair et al., 2015; Stahl et al., 2012; Stahl et al., 2016). So werden Dürrekonditionen, wie beispielsweise ein außergewöhnlich niedriger Wasserstand oder niedrige Niederschlagsmengen, nicht als Wirkungsbericht aufgenommen, solange keine negativen Konsequenz für Wassernutzer, Ökosysteme oder andere Sektoren auftreten (wie zum Beispiel die Limitierung von Schiffsladungen bei Niedrigwasser) (Bachmair et al., 2015; Stahl et al., 2016). Diese Auswirkungen können direkt (z.B. reduzierte Ernteerträge) oder indirekte Konsequenzen beschreiben (z.B. erhöhte Kosten von Nahrungsmitteln aufgrund geringer Ernteerträge) (Blauhut et al., 2016). In textbasierter Form werden in der Datenbank verschiedene Informationen zu den folgenden Punkten festgehalten (Stahl et al., 2012):

- Autor und Datum des Eintrages sowie automatische Nummerierung der Einträge,
- Art der Quelle (akademische Aufsätze, Regierungsberichte und Dokumente, Bücher, Zeitungsartikel und digitale Medien, Fachzeitschriften etc.),
- Ort der Auswirkungen oder betroffene Gewässer und Reservoirs (siehe folgend)
- Zeitpunkt der Auswirkung (Jahr und Monat oder Saison sowie überregionales Dürreereignis) (siehe folgend),
- Art der Auswirkung sowohl als beschreibenden Text auf Englisch, sowie auch die Einordnung in verschiedene Sektoren und detailliertere Unterteilung in verschiedene Kategorien (siehe folgend),
- wenn vorhanden, eventuelle indirekte Konsequenzen (z.B. Erhöhung der Preise für Korn bei reduziertem Kornertrag), sowie Maßnahmen zur Schadensminderung (z.B. Wasserzulieferung über Tankwagen aus anderen Regionen bei trocken gefallen Brunnen und Quellen).

Räumlich werden die Auswirkungen mindestens den einzelnen Ländern und, wenn möglich, anhand der Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (frz.: Nomenclature des Unités territoriales statistiques; ab hier: NUTS) zugeordnet. Wenn genauere Ortsangaben oder betroffene Oberflächengewässer und Oberflächenreservoirs bekannt sind, können diese angegeben werden. Die NUTS Gebiete stellen eine geografische Systematik in drei Hierarchiestufen innerhalb der Europäischen Union dar. Zur eindeutigen Bezeichnung der Gebiete wird jeder NUTS Region ein eindeutiger Code (je nach NUTS Ebene in

unterschiedlicher Länge) zugewiesen (Statistische Amt der Europäischen Union, 2015). In Deutschland entsprechen die 16 Gebiete auf NUTS1 Ebene den Bundesländern. Die 41 NUTS2 Gebiete gleichen den Regierungsbezirken und die 439 NUTS3 Gebiete spiegeln in Deutschland die Landkreise und kreisfreien Städte wider. (Letztgenannte Ebene wird in dieser Arbeit als NUTS3 oder Landkreise betitelt.) Bisher liegen nur wenige Dürreauswirkungsdaten auf NUTS3 Ebene vor. In der Literatur sind die EDII-Einträge für statistische Auswertungen bisher auf geringer aufgelösten Ebenen, wie den Bundesländer, im Ländervergleich oder für NUTS-Kombinationen zu europäischen Makroregionen, betrachtet worden (Bachmair et al., 2015; Bachmair et al., 2016b; Blauhut et al., 2015; Blauhut et al., 2016; Stagge et al., 2015a). Ein Herunterskalieren der Auswirkungsdaten auf die Ebene der Landkreise, also eine Betrachtung auf NUTS3 Ebene, hat noch nicht stattgefunden. Hier soll angemerkt werden, dass Einträge jeder Ebene in der EDII für Dürreauswirkungen stehen können, die das gesamte Gebiet der NUTS Region betreffen. Gleichzeitig können Einträge der EDII auch nur in Teilen das Gebiet der angegebenen NUTS Region betreffen. Letzteres ist der Fall, wenn die genaue Lage der berichteten Dürreauswirkungen entweder nicht bekannt oder kleinräumlicher ausgeprägt als die NUTS3 Ebene ist.

Die zeitliche Auflösung der Datenbank ist auf monatlicher bzw. saisonaler Basis. Die Jahreszeiten stehen repräsentativ für einen dreimonatigen Zeitraum wie folgt: Winter = (Dezember, Januar, Februar); Frühling = (März, April, Mai); Sommer = (Juni, Juli, August); Herbst = (September, Oktober, November). Als weitere Information kann das entsprechende überregionale Dürreereignis zugeordnet werden. Prinzipiell gilt, dass man bei dem Eintragen des Wirkungsberichts in die EDII Datenbank zwischen dem Zeitpunkt der Berichterstattung und dem Zeitpunkt des Dürreauftretens unterscheidet (Stahl et al., 2012). Wenn möglich soll sowohl der Start-, als auch der Endzeitpunkt der beobachteten Auswirkungen mit Monat und Jahr festgehalten werden.

Die Art der Dürreauswirkung wird in 15 Sektoren eingeteilt, die jeweils in weitere Kategorien unterteilt werden (siehe Anhang I Tabelle 7). Zusätzlich wird eine textbasierte Beschreibung der Dürreauswirkung gespeichert und der entstandene ökonomische Schaden, die Anzahl der betroffenen Personen oder die Größe der betroffenen Fläche können eingetragen werden. Die 15 Sektoren der EDII sind hier folgend aufgelistet:

- 1 Land- & Viehwirtschaft,
- 2 Forst,
- 3 Wasserkulturen & Fischerei,
- 4 Energie & Industrie,
- 5 Schifffahrt,
- 6 Tourismus & Naherholung,
- 7 Öffentliche Wasserversorgung,
- 8 Wasserqualität,
- 9 Aquatische Ökosysteme,
- 10 Terrestrische Ökosysteme,
- 11 Bodensysteme,

1 Einleitung

- 12 Waldbrände,
- 13 Luftqualität,
- 14 Gesundheit & Sicherheit und
- 15 Konflikte.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Der langfristige Nutzen von Dürremanagement ist die Minimierung bzw. Verhinderung von Folgen der Dürre. Im Zuge dessen ist das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, ein vertiefendes Verständnis über den Zusammenhang von Trockenheit gemessen an verschiedenen Dürreindizes und Dürreauswirkungen zu erlangen. Dies soll anhand einer Kombination zweier Monitorsysteme, dem Deutschen Dürremonitor und der EDII, erfolgen. Die beschriebene Kombination soll auf möglichst hoher räumlicher Auflösung geschehen. Für die EDII ist die Ebene der höchsten räumlichen Auflösung die NUTS3 Ebene. Nur ein geringer Anteil der Wirkungsberichte liegt auf dieser Ebene vor. Für keinen der betrachteten Auswirkungsbereiche wird auf NUTS3 Ebene der volle räumliche, zeitliche sowie kategoriale Umfang erfasst, der in den Wirkungsberichten der EDII auf den anderen NUTS Ebenen oder deutschlandweit beschrieben wird (siehe folgend Kapitel „3.3 Datengrundlage der EDII“). Die deutschlandweiten EDII Einträge, sowie die Einträge auf NUTS2 und NUTS1 Ebene sollen in dieser Arbeit auf NUTS3 Ebene übertragen werden, um eine kleinräumige Betrachtungsebene im Vergleich mit Dürreindizes gewährleisten zu können. Daher ist eine Herausforderung dieser Arbeit die Entwicklung einer Methodik, um EDII Einträge herunter zu skalieren.

Die Bodenfeuchte ist ein wichtiger Einflussfaktor für eine Vielfalt von klimatischen und hydrologischen Prozessen (Kulaglic et al., 2013; Potop, 2011). Sie erfasst die Wassermenge, die tatsächlich pflanzenverfügbar ist (Samaniego et al., 2013). Das pflanzenverfügbare Bodenwasser wirkt sich wiederum direkt auf die fotosynthetische Leistung und auf die Nettoprimärproduktion der Vegetation aus (Marx et al., 2016). Diese dient oftmals in Form von Grasbewuchs als Nahrungsgrundlage für Nutztiere (Committee of Agricultural Organisations und General Committee for Agricultural Cooperation, 2003). Daher gilt die Bodenfeuchte als direkter Schlüsselindikator für land- und viehwirtschaftlichen Dürre (Keyantash und Dracup, 2002; Kulaglic et al., 2013; Potop, 2011) und es kann angenommen werden, dass ein Zusammenhang der Bodenfeuchtedaten des Deutschen Dürremonitors zu den Wirkungsberichten in der EDII besteht. Grundsätzlich konnte bereits der Zusammenhang von Wirkungsberichten der EDII zur Bodenfeuchte in Form der Anomalie des Matrixpotential ΔpF (dekadische Logarithmus der Bodenwasserspannung) auf kombinierter NUTS Ebene von Blauhut et al. (2016) für Europa demonstriert werden. Mit höherer räumlicher Auflösung und den im Deutschen Dürremonitor genutzten Bodenfeuchteindizes wurde ein Zusammenhang zu Wirkungsberichten der EDII bisher noch nicht empirisch geprüft und soll hier erstmals durchgeführt werden.

Generell ist der land- und viehwirtschaftliche Sektor der meist betroffene Bereich, von dem Menschen direkt abhängen und von dem indirekt Auswirkungen auf die (inter-) nationale Wirtschaft ausgehen (Tallaksen und van Lanen, 2006). Dies ist in der EDII dadurch zu erkennen, dass die meisten Wirkungsberichte in Deutschland diesen Sektor betreffen (Stahl et al., 2016). Davon ausgehend, dass alle Dürreauswirkungen in der EDII erfasst sind, kann man annehmen, dass die Anzahl an Wirkungsberichten der EDII im relativen Vergleich die Intensität von Dürreereignissen widerspiegelt. Daher soll eine Korrelation der Anzahl an

2 Problemstellung und Zielsetzung

Dürreauswirkungen mit den Dürreindizes erfolgen. Dabei wird ein Anstieg der Anzahl an Dürreauswirkungen bei zunehmender Trockenheitsanomalie bzw. abnehmenden landwirtschaftlichen Dürreindizes, also ein negativer Korrelationszusammenhang erwartet. Als Vergleich dazu, soll auch eine Korrelation der Dürreindizes und den Informationen zum Auftreten von Dürreauswirkungen ohne Beachtung der Anzahl an Wirkungsberichten erfolgen.

Die in dieser Arbeit betrachteten Dürreindizes wurden für Flächen entsprechend der CORINE Landnutzungs-kategorie 2.1.1 „nicht bewässertes Ackerland“ berechnet (siehe Kapitel „3.2 Datengrundlage des Deutschen Dürremonitors“). Bei relativ geringer räumlicher Größe der NUTS3 mit klimatisch und naturräumlich ähnlichen Eigenschaften (siehe Kapitel „3.1 Klima, Geologie, Böden und Landnutzung in Deutschland“) ist zu erwarten, dass der Unterschied der Dürreanomalie innerhalb der Landkreise gering und daher vernachlässigbar ist. Daher wird ein negativer Korrelationszusammenhang zwischen landwirtschaftlichen Dürreindizes und Auswirkungen der gesamte Land- und Viehwirtschaft sowie unterteilt je nach Landnutzungs-kategorie erwartet.

Weiter wird für diese Betrachtung angenommen, dass die Stärke des Korrelationszusammenhangs für Auswirkungen exklusive der CORINE Landnutzungs-kategorie 2.1.1. geringer ist und ein höherer Zeitversatz auftritt als bei der Korrelationen ausschließlich dieser Landnutzungs-kategorie. Pflanzen mit einem weit ausgebildeten Wurzelsystem, wie Dauerkulturen, sind weniger anfällig für Dürre (Farooq et al., 2009). Jährliche Anbaufrüchte hingegen sind auf Niederschlag in speziellen phänologischen Phasen angewiesen. So ist Niederschlag im Juli beispielsweise elementar für Maiskulturen und kann nicht durch Niederschlag im Juni kompensiert werden (Smith, 1987). Dauerkulturen hingegen können Bodenfeuchte über längere Zeiträume speichern, da sie ein weit ausgebildetes und tief in die Erde reichendes Wurzelsystem besitzen. Sie besitzen vielseitige und komplexe Anpassungsstrategien wie Erhöhung der Stomata Resistenz, Tiefenbewurzelung, Akkumulation von Osmolyten und Ähnlichem (Farooq et al., 2009). Dürreauswirkungen werden aus diesem Grund teilweise nicht oder erst in anderen Wachstumsphasen der Pflanzen für den Menschen ersichtlich. Weiter sind Dürreereignisse nicht immer direkt in der viehwirtschaftlichen Produktion erkenntlich. Die viehwirtschaftlich Produktion ist essentiell vom Futterangebot und damit von Managementstrategien der jeweiligen Landwirte abhängig. Wie aus den EDII Wirkungsberichten erkenntlich wird, wird das Futter von Vieh häufig aus anderen Regionen angekauft oder besteht aus Lagerbeständen mehrerer Grünschnitte im Sommerhalbjahr. Futtermangel tritt erst bei Leerung solcher Vorräte zeitverzögert auf.

Neben dem Ansatz, landwirtschaftliche Dürreauswirkungen mit einem landwirtschaftlichen Dürreindex in Verbindung zu bringen, wird in der aktuellen Forschung ein indirekter Zusammenhang betrachtet. Dabei wird Dürre anhand eines entsprechend der Dürreausbreitungstheorie vorgeschalteten funktionalen Dürretyp vorhergesagt („predict drought from drought“ (Hannaford et al., 2011, S. 1147)). So konnte beispielsweise bereits mehrfach ein Zusammenhang der meteorologischen Dürre quantifiziert durch den SPEI zu Dürreauswirkungen des Land- und Viehwirtschaftlichen Sektors demonstriert werden

(Bachmair et al., 2015; Bachmair et al., 2016b; Blauhut et al., 2015; Blauhut et al., 2016; Stagge et al., 2015a). In dieser Arbeit soll der Zusammenhang von Niederschlags-Evapotranspirationsindizes zu land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen untersucht werden. Angenommen wird, dass der Zusammenhang im Vergleich zu den Bodenfeuchteindizes geringer ist und ein Zeitversatz beobachtet wird, da die Dürre Ausbreitung von vielen Faktoren des Klimas und der Einzugsgebiete abhängig ist und das vereinfachte Prinzip der Dürreausbreitung von einer Abmilderung und Zeitversatz der Dürresignale zwischen den funktionalen Dürreotypen ausgeht (Eltahir und Yeh, 1999; Peters et al., 2003; van Loon et al., 2011). Weiter ist es eine interessante Frage, ob die meteorologischen und landwirtschaftlichen Dürreindizes nicht nur als Zeiger für landwirtschaftliche Dürre, sondern ähnlich wie von (Hannaford et al., 2011; Wong et al., 2013) als Frühwarngröße für die hydrologische Dürre der Oberflächengewässer und Reservoirs genutzt werden können. Für diese Untersuchung sollen Wirkungsberichte der EDII betrachtet werden, die Auswirkungen auf die Abflussmenge beschreiben.

Neben der Quantifizierung der Stärke des Zusammenhanges von Dürreauswirkungen zu Dürreindizes ist es Ziel der Arbeit, die Schwellenwerte der Dürreindizes zu überprüfen. Die Höhe des Schwellenwertes, ab welchem Indexwert im Deutschen Dürremonitor das Auftreten von Dürre definiert wird, beruht auf der statistischen Wiederkehrwahrscheinlichkeit und ist bisher nicht mit dem Auftreten von Dürreauswirkungen verglichen worden. In der Literatur wird ein solcher Schwellenwert oft ohne weitere Überprüfung anhand vom 70ten oder 95ten Perzentil gewählt (Hannaford et al., 2011; Hisdal et al., 2004). Ob Dürreauswirkungen, wie zurzeit im Deutschen Dürremonitor angenommen, bei dem Schwellenwert von 0.2 auftreten, oder bereits/erst bei weniger bzw. stärker extremen Ereignissen zu beobachten sind, gilt es zu prüfen. Es ist fraglich, ob der Schwellenwert für gesamt Deutschland gleich, oder ob er für verschiedene Regionen oder Auswirkungsbereiche unterschiedlich zu wählen ist. Es wurde bereits gezeigt, dass die durch Dürreindizes beschriebenen Dürrekonditionen keine direkten Schlussfolgerungen zulassen, wo und wann genau Dürreauswirkungen auftreten (Bachmair et al., 2015; Blauhut et al., 2016). Dies kann unter anderem auf unterschiedliche Vulnerabilitäten verschiedener Sektoren und Regionen zurückgeführt werden. Das Dürreerisiko einer Region lässt sich mit einer Vielzahl an Einflussfaktoren wie dem Dürremanagement, der Gesetzgebung, Einzugsgebietscharakteristiken wie die Landnutzung etc. begründen (Blauhut et al., 2016). Daher ist es empfehlenswert einen Schwellenwert zu nutzen, der in Bezug auf das Auftreten von Dürreauswirkungen im betrachteten System bzw. Sektor überprüft wurde (van Loon, 2015).

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist der Vergleich der Eignung einzelner Dürreindikatoren als Zeiger für das Auftreten von Dürreauswirkungen. Besonderes Augenmerk soll hierbei dem SPEI_a gelten. In der bisherigen Literatur wurde der Wasserbilanz Index zur Kenntnis des Autors bisher als Niederschlags-Evapotranspirationsindex mit potentieller Verdunstung (Beguería et al., 2014) betrachtet. Allerdings wird bei der Berechnung des SPEI_p die potentielle Verdunstung als Exponentialgleichung der Lufttemperatur betrachtet. Dabei ist es wahrscheinlich, dass bei hohen Lufttemperaturen in den Sommermonaten

2 Problemstellung und Zielsetzung

Verdunstungsraten berechnet werden, die realitätsfern sein können, da Pflanzen bei Wassermangel ihre Stomata schließen und so einen weiteren Wasserverlust verhindern können (Jarvis und McNaughton, 1986; Mott K. A. und Parkhurst D. F., 1991). Insgesamt ist die Bedeutung der Evapotranspiration für die physikalischen Prozesse der Dürreentstehung bisher noch unbekannt (Teuling et al., 2013; van Loon, 2015). So soll in dieser Arbeit geprüft werden, wie die Leistung eines Niederschlags-Evapotranspirationsindex mit aktueller Verdunstung im Vergleich zu anderen Dürreindizes einzuschätzen ist.

Insgesamt kann die Zielsetzung dieser Masterarbeit wie folgt stichpunktartig zusammengefasst werden:

1. Methodenentwicklung zur Betrachtung der Dürreauswirkungen auf hochaufgelöster räumlicher Ebene
2. Untersuchung des (zeitlichen und räumlichen) Zusammenhanges zwischen Indizes des Deutschen Dürremonitors und den Auswirkungsdaten der European Drought Impact report Inventory
 - Hypothese: Meteorologische sowie landwirtschaftliche Dürreindizes können als Zeiger zum Auftreten von landwirtschaftlicher sowie hydrologischer Dürre genutzt werden. Ein negativer Korrelationszusammenhang zwischen den Dürreindizes und der Anzahl an Dürreauswirkungen besteht.
 - Hypothese: Aufgrund von Anpassungsstrategien von Dauerkulturen und Kompensationsmechanismen in der Viehwirtschaft liegt ein Zeitversatz zwischen dem Dürresignal der Indizes und den Auswirkungen vor und die Korrelationszusammenhänge sind weniger stark im Vergleich zur Korrelation der Indizes mit Dürreauswirkungen für einjährige Kulturen.
 - Hypothese: Entsprechend der Dürreausbreitungstheorie liegt ein Zeitversatz zwischen Dürreindizes zu Dürreauswirkungen verschiedener funktionaler Dürretypen (also von meteorologischen Dürreindizes zur landwirtschaftlichen und hydrologischen Dürre, sowie von landwirtschaftlichen Dürreindizes zur hydrologischen Dürre) vor.
3. Analyse von index- und sektorspezifischen Schwellenwerten, ab denen Dürreauswirkungen vorliegen und somit das Auftreten von Dürre definiert werden kann
 - Hypothese: Schwellenwerte variieren räumlich und zwischen verschiedenen Auswirkungsbereichen.
4. Vergleich der Bodenfeuchteindizes und Wasserbilanzindizes in ihrer Leistungsfähigkeit als Zeiger für das Auftreten von Dürreauswirkungen.

3 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

3.1 Klima, Geologie, Böden und Landnutzung in Deutschland

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit erstreckt sich über den nationalen Raum Deutschlands. Die Fläche beträgt in etwa 357 386 km², die Einwohnerzahl ca. 82 Millionen (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015). Das Klima Deutschlands zählt zu den gemäßigten Klimaten, welches besonders von dem Übergang vom westeuropäischen Maritimklima zum Kontinentalklima geprägt wird. Nach Köppen & Geiger wird das Klima als Cfb-Klima klassifiziert und zählt zum warmgemäßigten Regenklima (Köppen und Geiger, 1936). Der Jahresdurchschnittswert der Lufttemperatur liegt bei 8,2 °C mit einer gemittelten Anzahl von 1 544 Sonnenstunden im Jahr (Referenzzeitraum 1961-1990). Eine Karte der jährlichen Lufttemperatur ist in Anhang II Abbildung 28 dargestellt (Mühr, 2008). Die überwiegend westlichen Winde bringen ganzjährig feuchte Luftmassen vom Atlantik, sodass im Westen Deutschland tendenziell mehr Niederschlag als in den nordöstlichen Gebieten fällt (Vergleich Abbildung 3). Der Niederschlag beträgt im Durchschnitt 789 l/m². Lokal tritt eine regionale Klimavielfalt in Erscheinung (Effekte von Gebirgen etc.). Generell treten in ganz Deutschland milde Winter und gemäßigt warme Sommer mit Konvektionsereignissen auf (Deutscher Wetterdienst, 2016).

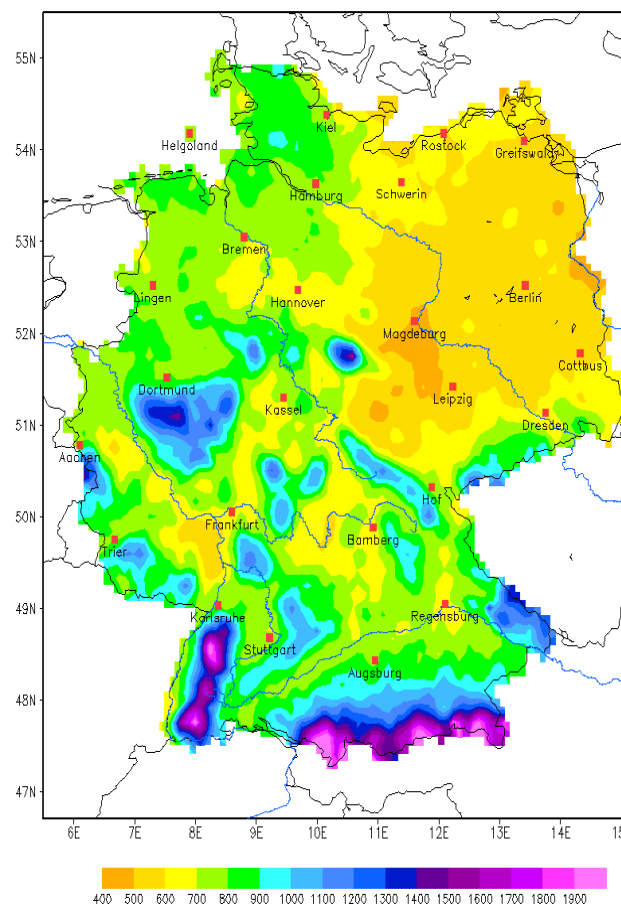


Abbildung 3: Mittlerer Jahresniederschlag [mm] für den Referenzzeitraum 1961-1990 (Mühr, 2008). Die hydrogeologische Situation in Deutschland wird in Abbildung 4 dargestellt. Hier kann man erkennen, dass es zehn verschiedene hydrogeologische Großräume unterschiedlicher

3 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Ausdehnung gibt. Den größten Teil nimmt das nord- und mitteldeutsche Lockergestein im Norden Deutschlands ein, das geologisch von quartären eiszeitlichen Ablagerungen bestimmt wird. Dieses Lockergestein weist einen hohen Porenhohlraumanteil und eine hohe Wasserdurchlässigkeit und ein ergiebiges bis sehr ergiebiges Grundwasservorkommen auf. Viele Bereiche im Westen und Osten Mitteldeutschlands weisen Formationen mit lokalen oder begrenzten Grundwasservorkommen oder Gebiete ohne nennenswerte Grundwasservorkommen auf. Durchschnitten werden diese Bereiche in zentralen Mittelgebirge Deutschlands durch Poren- und Kluft-Grundwasserleiter sowie auch Karstgebiete mit verschiedenen Ergiebigkeit. Aufgrund der Geologie und den meteorologischen Bedingungen sind die höchsten Grundwasserneubildungsraten in Süddeutschland (Schwarzwald und Alpenvorland) sowie in nordwestlichen Gebieten vorzufinden. Grundwasserneubildung von knapp 100 mm im Jahr sind in den östlichen Regionen Mitteldeutschlands und Norddeutschlands zu beobachten (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2015).

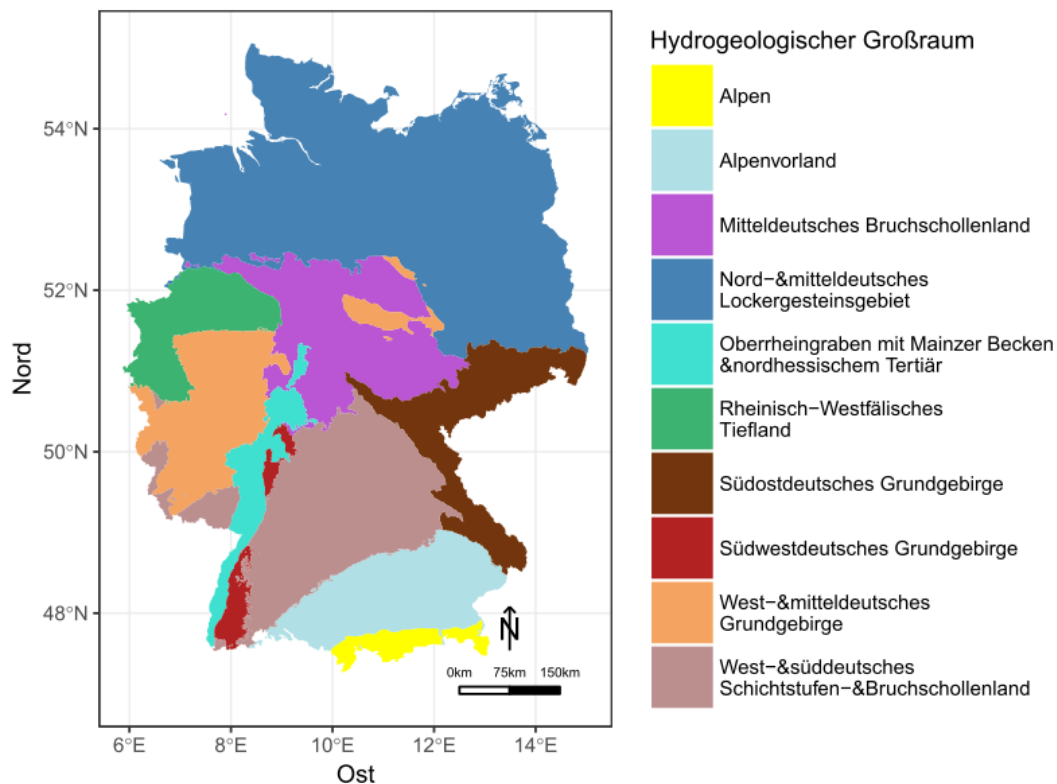


Abbildung 4: Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (verändert nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2015)).

Die Böden Deutschlands zeigen ein wesentlich heterogeneres Bild auf (siehe Abbildung 5). Im Norddeutschen Tiefland und Nordosten findet man vermehrt sehr tiefgründige, sandige Böden der Grund- und Endmoränenlandschaft. Hier treten vermehrt hoher Bodenfeuchte und gering bis mittel geneigte Hänge auf. Aufgrund der geringen Neigung und hohen Durchlässigkeit der Böden, tritt nur sehr ein geringer Oberflächenabfluss auf. Der Osten weist flächendeckend organische Gehalte unter 2 % auf. Im Nordosten Deutschlands ist die Wasserverfügbarkeit im Sommer trotz mittlerer bis hoher Feldkapazitäten im effektiven Wurzelraum sehr gering (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2017). Der Großteil Mittel- und Süddeutschlands wird von eher tonschluffigen und lehmigen Böden

bestimmt. Mäßig bis stark geneigte Hänge mit Böden verschiedener Gründigkeit dominieren im Bergland und Alpenvorland. Hier tritt geringer bis teils hoher Oberflächenabfluss auf. Der Oberrheingraben ist einer der wenigen Tiefenbereiche mit hoher Bodenfeuchte. Es treten mittlere bis hohe Anteile organischer Substanz im Oberboden auf. Im Westen Deutschlands werden eher gering bis sehr geringe und im Alpenvorland mittel bis hohe nutzbare Feldkapazitäten beobachtet. Die Wasserverfügbarkeit im Sommer ist für den Südwesten höher als für den Nordosten Deutschlands und erreicht lokal wie beispielsweise im Schwarzwald oder Oberrheingraben mit über 1000 mm äußerst hohe Mengen (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2017).

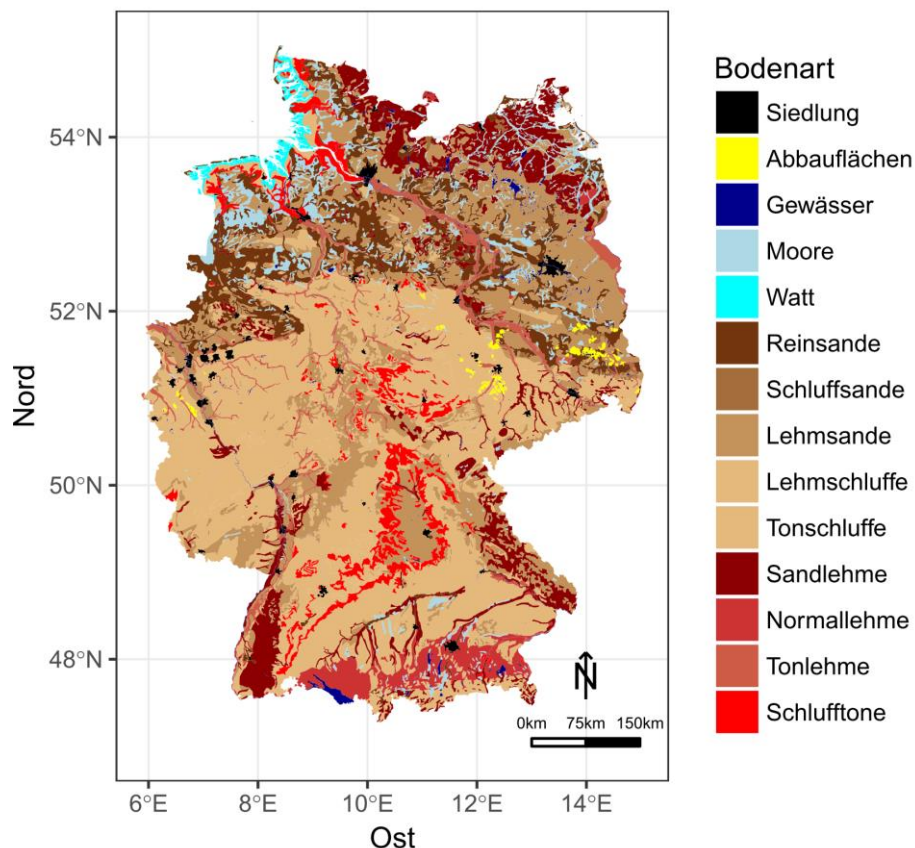


Abbildung 5: Bodenarten der Oberböden Deutschlands der Bodenübersichtskarte Maßstab 1:1 000 000 (verändert nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007)).

Betrachtet man zusätzlich die Landnutzung innerhalb der einzelnen Bundesländer (siehe Anhang II Tabelle 8), so fällt auf, dass die landwirtschaftliche Fläche die am stärksten vertretene Flächennutzung in Deutschland ist. Besonders hoch ist der Anteil in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen. Den höchsten Anteil an Wasserflächen zeigen neben den Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen die nördlichen Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Brandenburg. Ein Fokus dieser Arbeit liegt auf der Betrachtung von Dürreauswirkungen für die Land- und Viehwirtschaft unterteilt in verschiedene Landnutzungen kategorisiert nach CORINE Landnutzungsklassen (Europäische Umweltagentur, 2016). Abbildung 6 a) zeigt das nicht bewässerten Ackerland entsprechend CORINE Landnutzungs-kategorie 2.1.1 (ab hier

3 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

abgekürzt: CL) (siehe Anhang II Tabelle 9). Weiter sind in Abbildung 6 b) die restlichen landwirtschaftlich genutzten Flächen Deutschlands (ab hier abgekürzt: RLVW) entsprechend der CORINE Landnutzungsklassen für Dauerkulturen (2.2), Grünland (2.3) und heterogene Flächen (2.4) zu erkennen. Es wird deutlich, dass nicht bewässertes Ackerland besonders häufig im Norden sowie im Südosten Deutschlands vertreten ist. Im Vergleich dazu sind Flächen der restlichen Nutzungsklassen RLVW nur vermehrt in den Küstenregionen des Nordwestens sowie im Südosten Deutschlands vertreten. Insgesamt sind diese Landnutzungsklassen weniger dominant als die einjährigen Ackerkulturen auf nicht bewässerten Flächen CL.

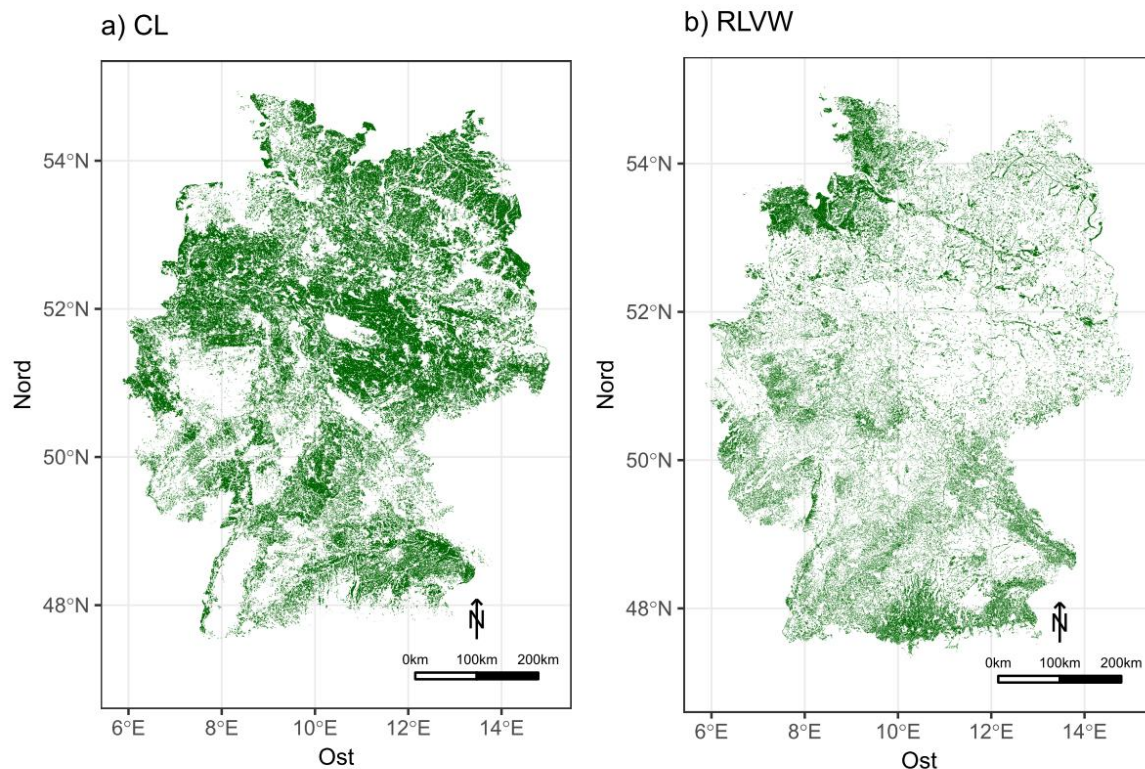


Abbildung 6: Flächenabdeckung der CORINE Landnutzungsklasse a) 2.1.1. nicht bewässertes Ackerland CL und b) den restlichen Klassen der Landwirtschaft 2.2. Dauerkulturen, 2.3 Grünland und 2.4 heterogenen Flächen RLVW aus dem Jahr 2006 (verändert nach Europäische Umweltagentur (2016)).

3.2 Datengrundlage des Deutschen Dürremonitors

Für die Erstellung der hier in der Arbeit betrachteten Dürreindexdaten wurde das mHM der Version 5.5 genutzt. Simuliert wurde der Zeitraum Januar 1951 bis Dezember 2015 also eine Referenzzeit von 65 Jahren. Die zeitliche Auflösung der Modellausgabe ist in Monaten. Die räumliche Auflösung in dieser Arbeit unterscheidet sich von dem online visualisierten 4x4 km Gitternetz. Hier wird das Raster der Modellausgabewerte auf die NUTS3 Regionen Deutschlands übertragen, um die gleiche räumliche Auflösung wie die Wirkungsberichte der EDII zu erhalten. Bei diesem Schritt wurden die deutschlandweiten Rasterdaten auf die nicht bewässerten Ackerflächen einjähriger Kulturen zugeschnitten. Dies entspricht der CORINE Landnutzungsklasse 2.1.1 nicht bewässertes Ackerland (Europäische Umweltagentur, 2016). Die so zugeschnittenen Daten wurden im darauf folgenden Schritt

auf eine 100×100 m Maske übertragen. Anhand dieser Maske wurden die Ausgabewerte für die NUTS3 Regionen Deutschlands räumlich durch Mittelung aggregiert. Eine schematische Darstellung der Abläufe zur Erstellung der Ausgabewerte kann Abbildung 7 entnommen werden.

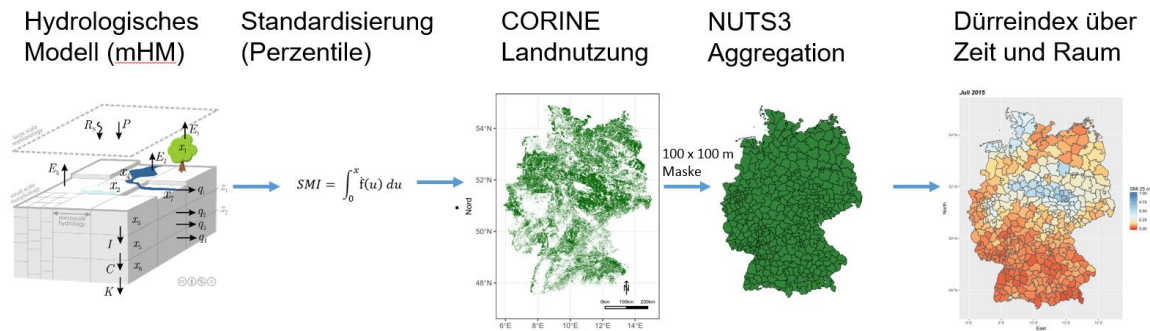


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Abläufe zur Erstellung der in dieser Arbeit betrachteten Dürreindizes auf NUTS 3 Ebene.

Betrachtet werden in dieser Masterarbeit folgende Ausgabewerte des mHMs:

- der Bodenfeuchteindex über die gesamte Bodentiefe (ab hier: $SMI_{1.8}$),
- der Bodenfeuchteindex der Bodenoberschicht bis 0.25 m Tiefe (ab hier: $SMI_{0.25}$),
- der standardisierter Niederschlags-Evapotranspirationsindex unter Betrachtung der aktuellen Verdunstung (ab hier: $SPEI_a$) und
- der standardisierter Niederschlags-Evapotranspirationsindex unter Betrachtung der potentiellen Verdunstung (ab hier $SPEI_p$).

Diese vier Indizes wurden, wie entsprechend in Kapitel „1.2 Dürreindizes“ beschrieben, auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1 entsprechend von Perzentile standardisiert. In der Standardisierung unterscheidet sich der in dieser Arbeit betrachtete Niederschlags-Evapotranspirationsindex von dem SPEI nach Beguería et al. (2014). Die Perzentil-Verteilung lässt den Schluss zu, dass, je stärker der Index unter 0.5 fällt, umso extremer sind die physikalischen Trockenbedingungen (Samaniego et al., 2013).

Beispielhaft wird in Abbildung 8 die Ausprägung des $SMI_{1.8}$ für den Juli im Jahr 2003 dargestellt. In diesem Monat traten laut des bisherigen Dürreschwellenwertes des Deutschen Dürremonitors von 0.2 vor allem in

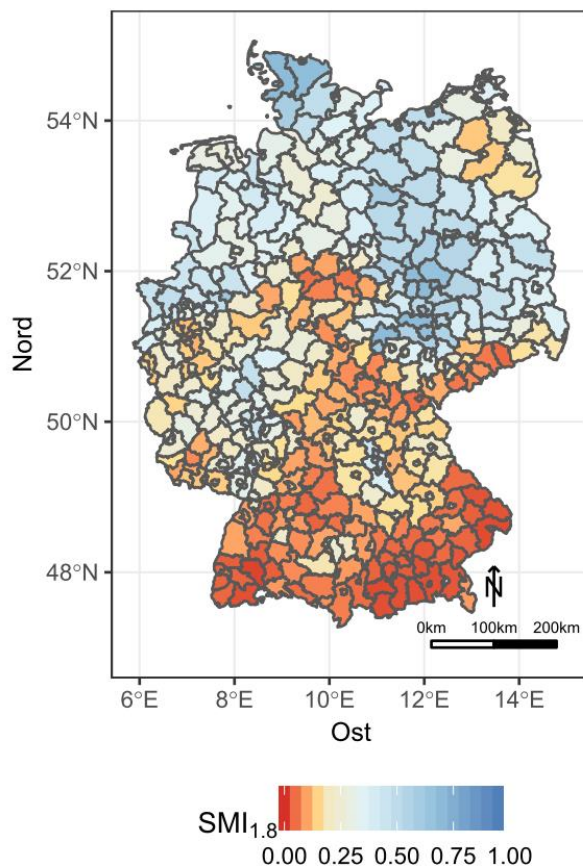


Abbildung 8: $SMI_{1.8}$ für 07/2003 auf NUTS3 Ebene aggregiert.

3 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

den südlichen Landkreisen sowie in einigen NUTS3 Regionen Mitteldeutschlands besonders trockene Bedingungen auf.

In Abbildung 9 ist weiter ein Verlauf der Dürreindizes für den Landkreis Freiburg im Breisgau (NUTS3 Identifikation DE131) dargestellt. In der oberen Darstellung der Abbildung 9 kann man erkennen, dass der $SMI_{0.25}$ stärker zeitlich variabel ist als der $SMI_{1.8}$ und im Vergleich in dem betrachteten Zeitraum öfter unter den Dürreschwellenwert von 0.2 fällt. Der $SPEI_a$ und $SPEI_p$ haben nur in wenigen Ausnahmen unterschiedliche Werte. Solche Abweichungen sind besonders häufig in den Sommermonaten vorzufinden. Im Vergleich zu den SMI Werten fallen die standardisierten Niederschlags-Evapotranspirationsindizes in dem betrachteten Zeitraum häufiger unter den bisher angenommenen Schwellenwert und zeigen eine höhere zeitliche Variabilität.

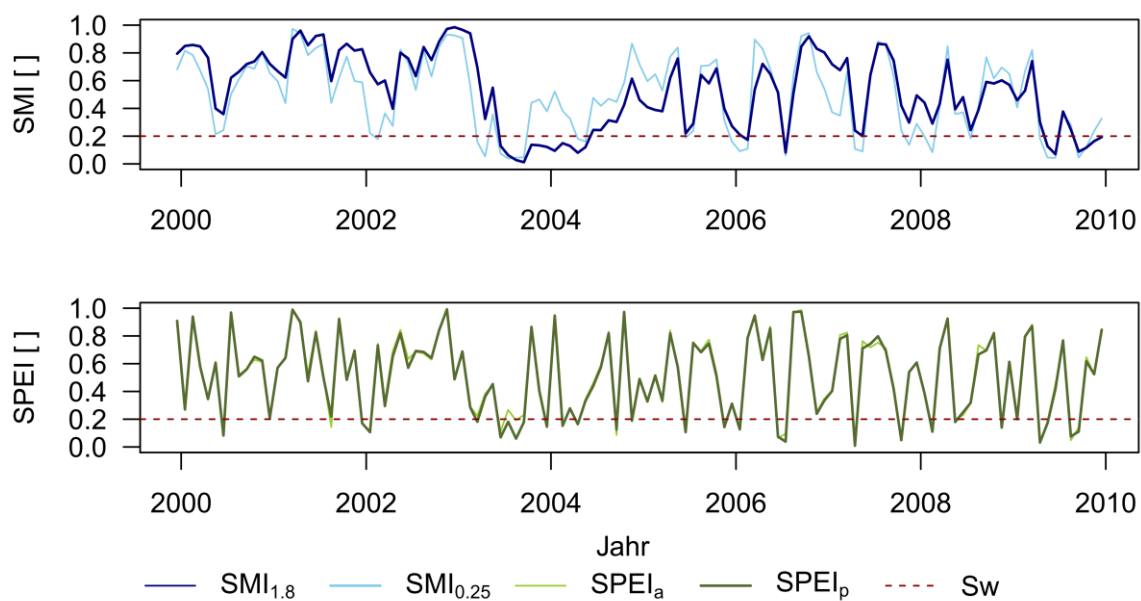


Abbildung 9: Zeitreihe (von 01/2000 bis 12/2010) der im mHM (Version 5.5) berechneten Dürreindizes für den Landkreis Freiburg im Breisgau aggregiert. In rot der bisher zur Dürreklassifikation angenommene Schwellenwert (hier abgekürzt: Sw) von 0.2.

3.3 Datengrundlage der EDII

In dieser Arbeit wurde die EDII Version vom 28.07.2017 genutzt. In der Datenbank sind für Deutschland sektorenübergreifend 1 157 Datenbankeinträge dokumentiert, von denen 1 113 Datenbankeinträge im Zeitraum 01/1951 bis 12/2015 liegen. Zur statistischen Auswertung der Datenbankeinträge erfolgt eine Aufbereitung der Datengrundlage. Die unbearbeiteten Datenbankeinträge der EDII werden im Folgenden als Einträge oder auch als Wirkungsberichte bezeichnet. Für die statistische Analyse werden die Einträge in eine monatliche Anzahl an Dürreauswirkungen pro NUTS Gebiet umgewandelt. Bei dieser Umwandlung werden Wirkungsberichte auf ihre zeitliche sowie räumliche Ausdehnung und die Anzahl der genannten Kategorien untersucht und differenziert. Alle in der Arbeit betrachteten Dürreauswirkungen (engl.: Impacts; ab hier abgekürzt: I) beziehen sich auf die so erstellte Aufbereitungsform der EDII Daten. Die Umwandlung von Datenbankeinträgen zu Auswirkungen bedeutet konkret, dass die Wirkungsberichte, die mehrere Kategorien und

mehrere NUTS Gebieten betreffen, entsprechend mehrfach als Dürreauswirkungen gewertet werden. Zusätzlich können Wirkungsberichte unterschiedlich lang andauernde Dürreauswirkungen beschreiben. In dieser Arbeit hingegen werden die Einträge differenziert für die jeweilig betroffenen Monate betrachtet. Dabei wird für jeden Monat zwischen Start- und Endzeitpunkt des Eintrages eine Dürreauswirkung gewertet. Sind entsprechende Saisonangaben im Eintrag vorhanden, so werden diese wie in Kapitel „1.3 Dürreauswirkungen und die EDII“ beschrieben, für jeweils drei Monate gewertet. Ist entweder nur der Startmonat oder nur der Endmonat im Wirkungsbericht angegeben, wird nur für den genannten Monat eine Dürreauswirkung gewertet. Einträge, in denen nur eine Jahreszahl und keine konkreten Monats- oder Saisonangaben vorhanden sind, werden nicht in die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse mit einbezogen. Die fehlenden Angaben werden nicht ersetzt, um unsichere Annahmen über Start- und Ende der Auswirkungen zu vermeiden.

Der Vergleich mit den Dürreindizes soll zum einen für alle Kategorien innerhalb des Sektors der Land- und Viehwirtschaft (ab hier abgekürzt: I_{LVW}) der EDII durchgeführt werden. Zum anderen soll der Vergleich für die Auswirkungskategorien unterteilt nach Landnutzungsklasse stattfinden. Zunächst sollen nur die Auswirkungen der Kategorien betrachtet werden, die sich (wie die Flächen, für die die Dürreindizes berechnet wurden) auf die CORINE Landnutzungsform 2.1.1 CL beziehen (abgekürzt: I_{CL}). Daraufhin wird der Vergleich mit den Auswirkungen der restlichen Kategorien des Sektors RLVW (abgekürzt: I_{RLVW}) durchgeführt. Weiter soll ein Vergleich der Dürreindizes mit Auswirkungen, die sich auf Abflussmengen R beziehen (abgekürzt I_R) geschehen. Hier werden die in genannter Tabelle 7 markierten Kategorien verschiedener Sektoren zusammengefasst. Dabei wurden all jene Auswirkungen unbeachtet gelassen, die einer Temperaturerhöhung der Gewässer zu Grunde liegen. So sollen mögliche Auswirkungen von Hitzeeffekten ausgeschlossen werden.

Betrachtet man die Datengrundlage des Sektors der Land- und Viehwirtschaft für Deutschland, so stehen 234 Einträge in der EDII zur Verfügung. Dabei beschreiben 62 Einträge Einflüsse für Deutschland (ohne nähere Ortsbeschreibung über die NUTS Gebiete). Diese lassen sich über die gesamten 65 Jahre in 148 Auswirkungen (I_{LVW}) umwandeln. 107 Einträge und damit die meisten Einträge für den Sektor, sind auf NUTS1 Ebene (379 Dürreauswirkungen) vorhanden, lediglich 18 Einträge beziehen sich auf NUTS2 Ebene (129 Auswirkungen) und 47 Einträge (311 Auswirkungen) sind auf NUTS3 Ebene vorhanden. Betrachtet man abflussbezogene Dürreauswirkungen (exklusive Hitzeeffekte) für Deutschland, so stehen 458 Einträge in der EDII zur Verfügung. 44 dieser Einträge beziehen sich auf die gesamte deutsche Fläche (ohne nähere Ortsbeschreibung über die NUTS Gebiete). Diese lassen sich in 50 Auswirkungen (I_R) umwandeln. 157 Einträge sind auf NUTS1 Ebene (302 Dürreauswirkungen) vorhanden und lediglich 36 Einträge beziehen sich auf NUTS2 Ebene (32 Auswirkungen). Auf NUTS2 Ebene ist die Anzahl an Auswirkungen geringer als die Zahl der Datenbankeinträge, da in vielen Fällen Monats- und Saisonangaben fehlen und solche Einträge nicht in der Analyse betrachtet werden. 221 Einträge (244 Auswirkungen) sind auf NUTS3 Ebene vorhanden.

3 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Als nächster Schritt wird die zeitliche Variabilität aller Auswirkungen für ganz Deutschland pro Monat aufsummiert (sowohl für die Land- und Viehwirtschaft sowie auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen) betrachtet. Die Auswirkungen von Vieh- und Landwirtschaft (I_{LVW}) der kleinsten angegebenen Ebenen für alle NUTS Regionen für Deutschland pro Monat aufsummiert wird in Abbildung 10 im zeitlichen Verlauf dargestellt. Aus dieser Darstellung wird erkenntlich, dass weder auf NUTS3 noch auf NUTS2 Ebene eine umfangreiche Datengrundlage für die als Ziel gesetzte statistische Analyse zur Verfügung steht. Das zeitliche Auftreten von Dürreauswirkungen über die Monate ist bei beiden hochaufgelösten NUTS Ebenen ähnlich und die Informationen decken nur einen kleinen Bruchteil (zehn beziehungsweise dreizehn Monate für Land- und Viehwirtschaft) der gesamten Zeitreihe mit 780 betrachteten Monaten ab. Das Jahr 2015 weist die meisten Dürreauswirkungen auf. Betrachtet man im Vergleich die Zeitreihe der deutschlandweit aufsummierten Auswirkungen auf der NUTS1 Ebene oder Dürreauswirkungen gesamt Deutschland betreffend, so treten grundlegend mehr Monate mit Dürreauswirkungen auf. Dies sind wertvolle Informationen, die bei Betrachtung ohne Skalierung sonst verloren gehen würden.

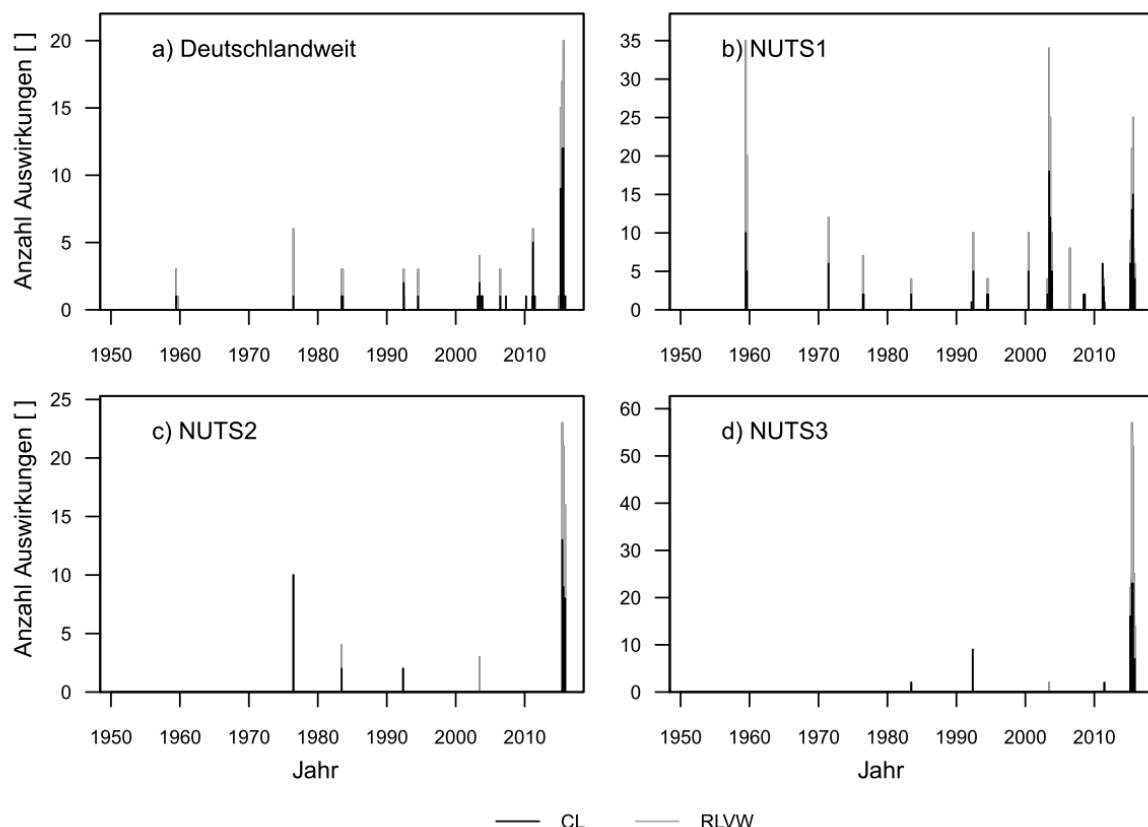


Abbildung 10: Zeitliche Variabilität (von 01/1951 bis 12/2015 pro Monat) der Anzahl von land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen I_{LVW} für alle NUTS Regionen pro Ebene aufsummiert. Zu beachten ist, dass die y-Achsen der Abbildungen a)-d) unterschiedliche Spannweiten haben.

Die zeitliche Variabilität der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen (I_R) der kleinsten angegebenen Ebenen für alle NUTS Regionen für Deutschland pro Monat aufsummiert im Vergleich zu den land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen wird in Anhang II Abbildung 29 dargestellt. In einigen Fällen kann man erkennen, dass die auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen (I_R) wenige Monate nach den land- und

viehwirtschaftlichen Auswirkungen auftreten. Weiter wird deutlich, dass auf allen Ebenen kaum EDII Einträge vor dem Jahr 2003 in der Datenbank eingetragen sind. Lediglich auf NUTS1 und NUTS2 Ebene gibt es einige wenige Daten. Es ist also notwendig, eine Methode zum Herunterskalieren der Daten zu entwickeln, um die volle zeitliche Variabilität der EDII Einträge zu erfassen. Man kann also folgern, dass die weniger aufgelösten Ebenen mehr Informationen über das zeitliche Auftreten von Dürreauswirkungen erkennen lassen als die höher aufgelösten Ebenen. Es ist notwendig, eine Methode zu entwickeln, die Auswirkungen geringer aufgelöster NUTS Ebenen sinnvoll auf die NUTS3 Ebene herunterskalieren kann, um die volle zeitliche Variabilität der EDII Einträge nutzen zu können.

Als weiteren Aspekt werden nun die Anteile einzelner Kategorien auf den verschiedenen Ebenen zu den gesamten Einträgen der beiden Auswirkungsbereiche betrachtet. In Abbildung 11 wird für die Land- und Viehwirtschaft ersichtlich, dass es auf keiner räumlichen Ebene Einträge der Kategorie 1.4 „Verringerte Wasserverfügbarkeit zur Bewässerung“ gibt. Weiter wird deutlich, dass die Kategorie 1.1 „Reduzierte Produktivität der Anbaufläche jährlicher Fruchtkulturen“ am häufigsten als Dürreauswirkungen in der EDII beschrieben wird. Insgesamt unterscheiden sich die Größenordnungen der Anteile einzelner Kategorie über alle räumlichen Auflösungen bis zu 15 %. Die kategorialen Anteile für die auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen werden in Anhang II in Abbildung 30 gezeigt. Aus der Darstellung geht klar hervor, dass sich bei diesem Auswirkungsbereich die Anteile einzelner Kategorien zwischen den verschiedenen NUTS Ebenen deutlich unterscheiden. Während beispielsweise die Auswirkungen des Sektors 5 „Transport auf Wasserwegen“ der Kategorie 5.4 „Steigende Kosten/ ökonomische Verluste“ deutschlandweit die Hälfte der Auswirkungen darstellen, ist auf NUTS2 Ebene keine Auswirkung dieser Kategorie verzeichnet.

Aus den beiden bisherigen Betrachtungen kann man nicht entnehmen, ob alle NUTS Gebiete Auswirkungen aufweisen und einen Vergleich mit den Indexwerten für alle Regionen Deutschlands ermöglichen. Daher soll neben der zeitlichen und kategorialen Verteilung der Landwirtschaftseinträge nun die räumliche Verteilung der Auswirkungen (über die gesamte Zeitreihe pro NUTS Region aufsummiert) betrachtet werden. Die entsprechende räumliche Ausdehnung und Benennung der NUTS Gebiete entstammen digitalen Flächendateien in Form von Polygonen im ETRS89 Koordinatenreferenzsystem (Statistische Amt der Europäischen Union (2007) verändert nach Blauhut). Aus der Darstellung in Abbildung 12 wird deutlich, dass es nur wenige NUTS3 Landkreise gibt, für die mindestens eine Dürreauswirkung der Land- und Viehwirtschaft über die gesamte Zeitreihe vorliegt. Von 439 Landkreisen gibt es nur 35 Landkreise, für die auf NUTS3 Ebene Dürreauswirkungen verzeichnet sind. Für die NUTS2 Ebene gibt es aus 41 Regierungsbezirken nur 11 Regierungsbezirke, die in der Datenbank mit Dürreauswirkungen vertreten sind. Auf NUTS1 Ebene weisen alle Bundesländer mindestens eine Dürreauswirkung in dem betrachteten Referenzzeitraum von 1951-2015, mit einem Nord-Süd-Gradient in der Anzahl an Dürreauswirkungen, auf. Deutschlandweit gibt es 154 Dürreauswirkungen die verteilt auf insgesamt 34 Monate innerhalb der 65 Jahre

3 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

auftreten. Gleichzeitig ist erkennbar, dass auf NUTS2 und NUTS3 Ebene Einträge lediglich konzentriert auf einige Gebiete im Südwesten, teils Südosten/Zentrum und Nordosten vorkommen. Über große Teile Mittel-Deutschlands liegen auf diesen Ebenen keinerlei Informationen zu Dürreauswirkungen der Land- und Viehwirtschaft in der Datenbank vor. Für die räumliche Verteilung der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen gilt gleichermaßen, dass auf NUTS3 und NUTS2 nur wenige Wirkungsberichte in der EDII vorliegen (siehe Anhang II Abbildung 31). Auf NUTS1 Ebene gibt es drei Bundesländer ohne einen Wirkungsbericht (Saarland, Thüringen und Bremen). Auf NUTS1 Ebene gibt es mehr Dürreauswirkungen im Süden Deutschlands als im Norden. Ein statistischer Vergleich mit den Dürreindizes auf NUTS3 Ebene ohne Herunterskalieren von Auswirkungsdaten ist schlussfolgernd kaum möglich, um Aussagen über alle Flächen Deutschlands für diesen Auswirkungsbereich treffen zu können.

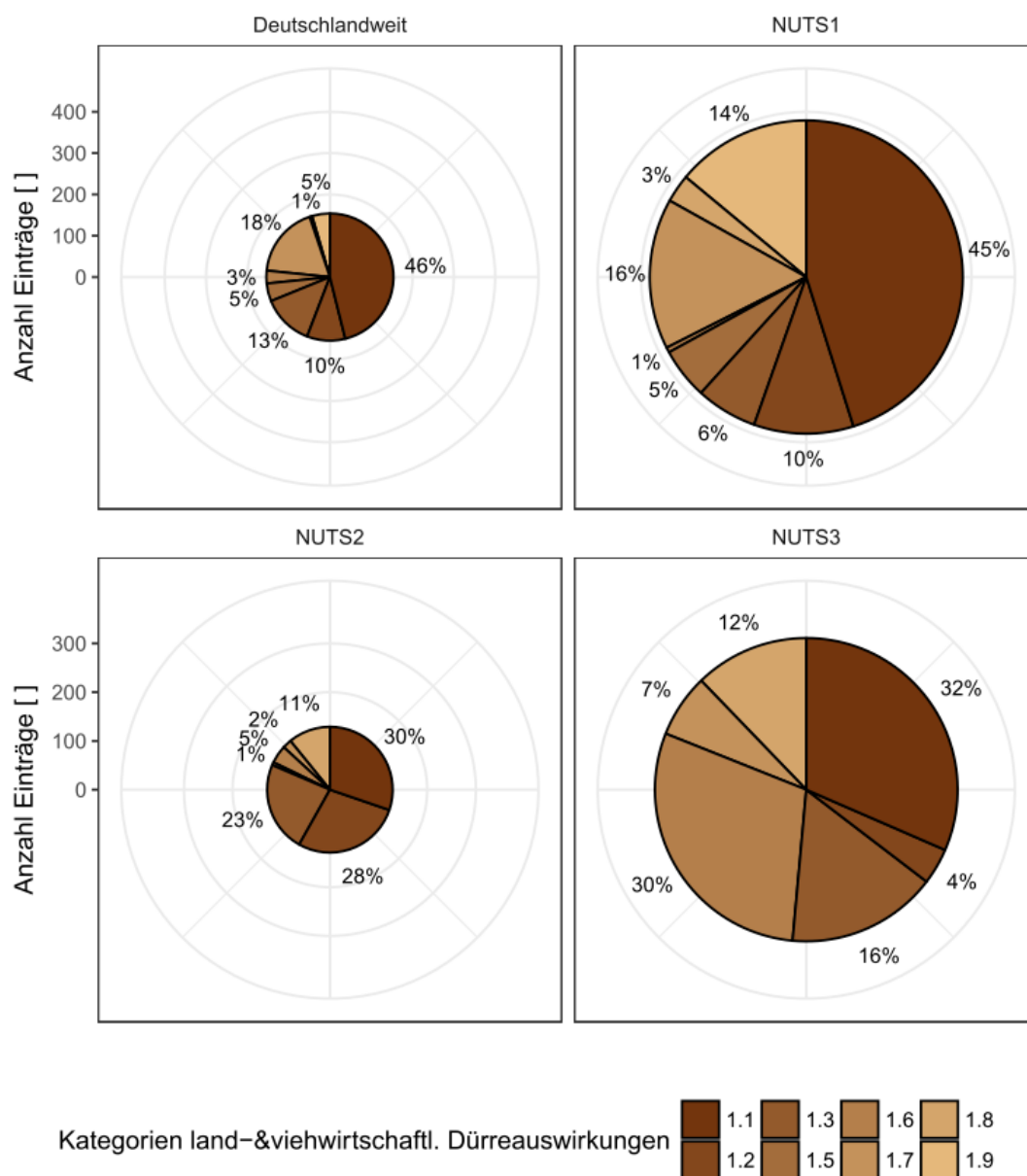


Abbildung 11: Kuchendiagramme kategorialer Anteile entsprechend Anhang I Tabelle 7 der berichteten Dürreauswirkungen der Land- und Viehwirtschaft. Zu beachten ist, dass die Größe der Kuchendiagramme für die oberen und unteren Darstellungen variiert.

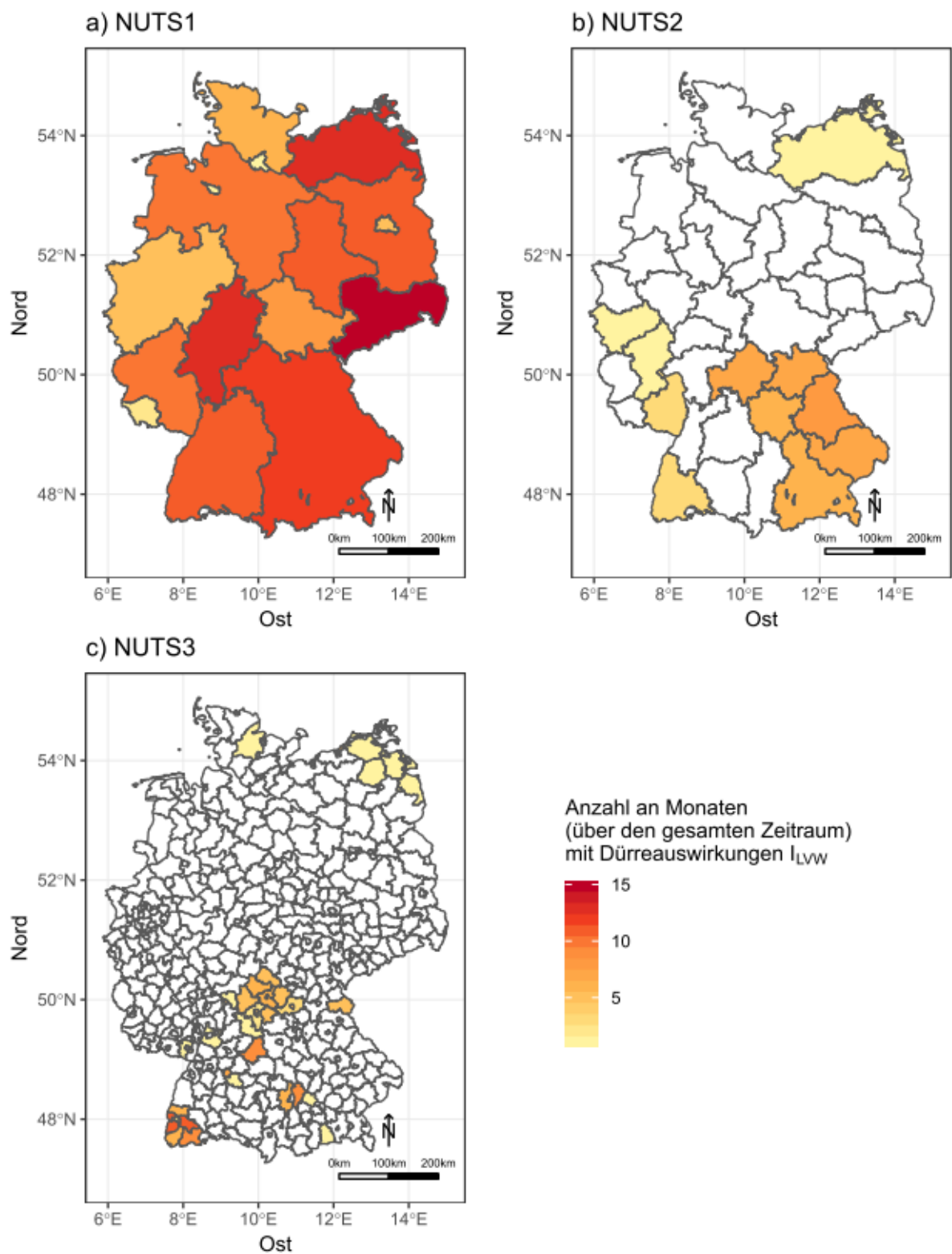


Abbildung 12: Karten der Anzahl an Monaten mit land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen I_{LVW} auf den kleinsten bestimmaren Ebenen (von 01/1951 bis 12/2015). Weiße NUTS Regionen zeigen an, dass keine Dürreauswirkungen in der EDII beschrieben werden.

4 Methodik

4.1 Skalierung der Dürreauswirkungsdaten

Nach Ausführung der Datengrundlage aus der EDII kann man zusammenfassen, dass eine Betrachtung der unbearbeiteten Daten weder auf NUTS3, noch auf NUTS2 Ebene möglich ist, um ausreichende Informationen über räumliche, zeitliche und sektorale Auftrittscharakteristika der Dürreauswirkungen zu ziehen. Eine Skalierung der Daten auf eine gemeinsame Ebene muss stattfinden, um die Fülle an Informationen der EDII Datenbank nutzen zu können. Eine Hochskalierung der NUTS3 Daten auf NUTS2 oder höhere Ebenen wurde in der Literatur mehrfach ohne Gewichtung durchgeführt (Bachmair et al., 2015; Bachmair et al., 2016b; Blauhut et al., 2015; Stahl et al., 2012). Die räumliche Auflösung dieser Arbeit soll möglichst kleinräumig sein und daher der NUTS3 Ebene entsprechen. Diese Ebene wurde bisher noch nicht im Vergleich zu Dürreindizes betrachtet. Die Auswirkungen, die ursprünglich in der EDII auf NUTS3 Ebene berichtet wurden werden im Folgenden als „NUTS3 Originaldaten“ bezeichnet. Für das Herunterskalieren der Wirkungsberichte werden zwei verschiedene Methoden angewendet. Zum einen ist es möglich, die Einträge flächengewichtet zu übertragen. Dabei bekommt beispielsweise eine NUTS3 Region, die nur 20 % der NUTS2 Region mit einer Dürreauswirkung abdeckt, einen entsprechenden Dürreauswirkungsbericht von 0.2 statt 1 aufsummiert. Diese Skalierungsmethode wird im Folgenden „flächengewichtete Skalierung“ genannt. Andererseits ist es möglich, die Auswirkungen eins zu eins auf die höher aufgelösten Ebenen zu übertragen. Ab hier wird diese Skalierungsmethode als Methode „ohne Flächengewichtung skaliert“ betitelt.

4.2 Autokorrelationsanalyse der Dürreindizexdaten

Vor der Betrachtung des Zusammenhanges von Dürreauswirkungen zu Dürreindizes werden die zeitliche und räumliche Autokorrelation der Dürreindizes untersucht. Für die Berechnung der zeitlichen Autokorrelationen pro Landkreis wird die acf-Funktion in R genutzt (<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/acf.html>), die automatisiert ein entsprechendes Signifikanzniveau berechnet (Chambers et al., 2002, 2002). Weiter werden die Zeitreihen der Dürreindizes der einzelnen Landkreise auf räumliche Korrelationen untereinander geprüft (Hedderich und Sachs, 2016). Korrelationskoeffizienten nahe 1 sprechen für gleiche Ausprägungen der Anomalien im Lauf der Zeit und eine Clusteranalyse wird durchgeführt. Clustern ist das Gruppieren einer Grundgesamtheit in der Art und Weise, dass Stichproben ähnlicher Ausprägung zueinander zugeordnet werden. Dabei gilt, dass so viele Clustergruppen wie nötig und so wenige wie möglich gebildet werden sollen (Fraley und Raftery 2007). In dieser Arbeit wurde die hierarchische Cluster Methode genutzt, um NUTS3 Landkreise zu gruppieren, die einen ähnlichen Verlauf des jeweiligen Dürreindex über die Zeit aufzeigten. Mit Hilfe der Mclust Funktion in R (<http://www.stat.washington.edu/mclust/>) kann über einen sogenannten Gauß-Finite-gemischte-Effekte-Modell mit Erwartungs-Maximierungs-Algorithmus

4 Methodik

(anhand des Bayesianischen Informationskriteriums „BIC“) die optimale Anzahl an Clustern bestimmt werden (Fraley und Raftery, 2007). Jede der 439 NUTS3 Regionen pro betrachtetem Dürreindex wird eine Clustergruppe zugeteilt. Diese Clustergruppen sollen bei der Korrelations- und Schwellenwertanalyse als regionale Betrachtungsebene dienen und die Ergebnisse aller darin liegenden NUTS3 für die jeweiligen Analyseergebnisse gemittelt werden. Der Ablauf der in dieser Arbeit durchgeführten Analyse wird in Abbildung 13 schematisch dargestellt.

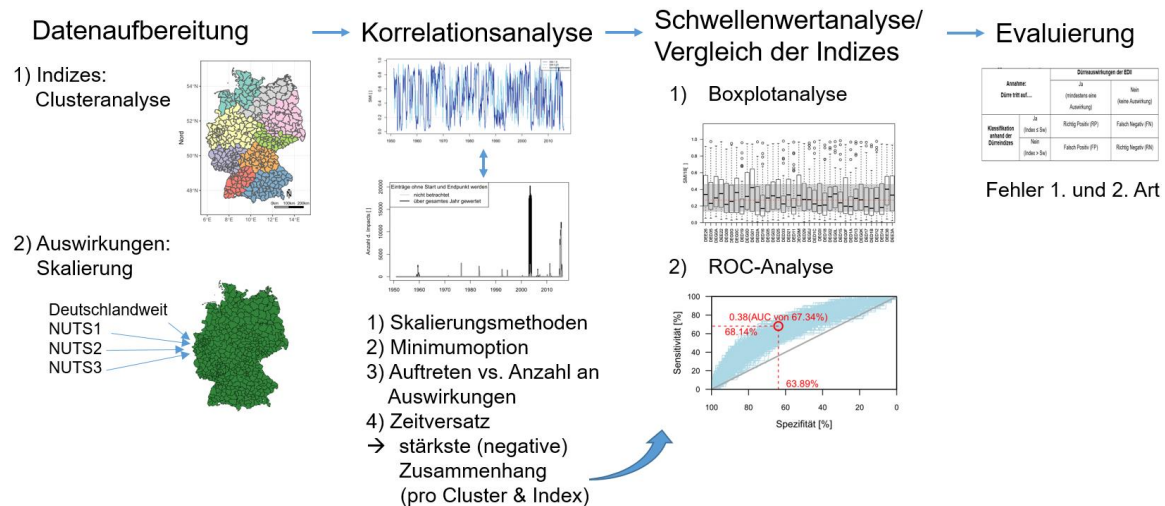


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Schritte der in dieser Arbeit durchgeführten Analyse.

4.3 Korrelationsanalyse

Entsprechend Stahl et al. (2015) gibt es drei Methoden den Zusammenhang von Dürreindizes und Dürreauswirkungsdaten zu untersuchen: Die Korrelationsanalyse von Dürreindizes zu Dürreauswirkungen wie beispielsweise Bachmair et al. (2015), die Schwellenwertermittlung anhand der Medianwerte von Dürreindex-Verteilungen der Monaten mit Auftreten von Dürreauswirkungen wie De Stefano et al. (2015) und Bachmair et al. (2015), sowie die logistische Regressionsanalyse um die Auftrittswahrscheinlichkeit von Dürreauswirkungen anhand von Dürreindikatoren bzw. Dürreindizes zu beschreiben wie beispielsweise Blauhut et al. (2016), Blauhut et al. (2015) und Stagge et al. (2015a). Die ersten beiden Methoden werden in dieser Arbeit verwendet. Bei dem Vergleich der Dürreindizes und der Dürreauswirkungen wird hierbei mit einer zeitlichen Auflösung von Monatsmittelwerten gearbeitet und eine räumlichen Auflösung der NUTS3 Landkreise Deutschlands betrachtet.

In einem ersten Schritt wird die Korrelation, also entsprechende Signifikanzen (p) und Korrelationskoeffizienten (r), zwischen den Dürreindizes und der Anzahl an Dürreauswirkungen der Zeitreihen pro Landkreis berechnet. Dabei wird die rangbasierte Spearman-Korrelation angewendet, die den Vorteil hat, dass die Daten keiner Normalverteilung folgen müssen (Hedderich und Sachs, 2016). Ein weiterer Vorteil bei dieser Art der Korrelationsanalyse ist, dass auf einen monotonen Zusammenhang getestet wird (im Unterschied zum Pearson Korrelationskoeffizient der einen linearen Zusammenhang untersucht) (Hedderich und Sachs, 2016). Ein monotoner Zusammenhang

liegt dann vor, wenn bei Zunahme der Anzahl an Dürreauswirkung die kontinuierliche Abnahme (oder entgegen der Erwartungen die kontinuierliche Zunahme) von Dürreindexwerten erkennbar ist, ohne die absoluten Differenzen innerhalb beider Datensätze zu beurteilen. Ob der Zusammenhang linear, exponentiell oder anderen monotonen Verteilungen entspricht wird nicht betrachtet. Der Korrelationskoeffizient wird (vereinfacht bei Korrelationen ohne Bindungen) entsprechend Formel 4 berechnet.

Formel 4: rangbasierter Spearman Korrelationskoeffizient (ohne Bindungen) nach Hedderich und Sachs (2016).

$$r = 1 - \frac{6 \sum D^2}{n \times (n^2 - 1)}$$

r Rangbasierte Spearman Korrelationskoeffizient auf Landkreisebene
D Differenzen der Rangplätze
n Stichprobenumfang

Es gilt, dass je näher der Korrelationskoeffizient an 1 bzw. -1 ist, umso stärker ist der monotone Korrelationszusammenhang. Der erwartete Zusammenhang zwischen Anzahl der Dürreauswirkungen und der Dürreindizes ist eine negative Korrelation (je mehr Dürreauswirkungen, umso geringer der Dürreindex). Daher wird lediglich bei positiven Korrelationskoeffizienten darauf hingewiesen, dass der Korrelationszusammenhang positiv ist. Wird das Vorzeichen der Korrelationsstärke nicht genannt, liegt ein negativer Korrelationskoeffizient vor. In der Literatur werden verschiedene Einteilungen der Koeffizienten genutzt (Hedderich und Sachs, 2016). Hier wird die Stärke der Korrelation anhand des auf zwei Stellen gerundeten Korrelationskoeffizienten r in folgende Klassen unterteilt:

- $|r| < 0.1$ keine Korrelation,
- $0.1 \leq |r| < 0.3$ schwache Korrelation,
- $0.3 \leq |r| < 0.6$ moderate Korrelation,
- $0.6 \leq |r| < 0.9$ starke Korrelation und
- $|r| \geq 0.9$ sehr starke Korrelation.

Die Signifikanz der Korrelation ist vom Umfang der betrachteten Daten abhängig. In der Literatur wird mit verschiedenen Signifikanzniveaus für den p-Wert gearbeitet. Typische Werte sind beispielsweise 0.01 (große Stichproben), 0.5 (mittelgroße Stichproben) und 0.1 (kleine Stichproben) (Hedderich und Sachs, 2016). Der Signifikanzwert wird aufgrund der teils geringen Stichprobenumfänge in dieser Arbeit bei 0.1 gewählt.

In die Analyse fließen nur Jahre ein, in denen mindestens eine Dürreauswirkung in einem beliebigen Monat des Jahres für den entsprechenden Landkreis auftrat. Jahre, in denen es keine Dürreauswirkungen in der EDII gibt, werden nicht betrachtet, da man davon ausgehen kann, dass ein Mangel an Wirkungsberichten vorliegt und nicht zwangsweise, dass es keine Dürreauswirkungen gab (siehe Bachmair et al. (2015)). Weiter wird hier die Korrelationsanalyse nur für Landkreise durchgeführt, in denen über den gesamten Zeitraum zehn oder mehr als zehn Monate mit Dürreauswirkungen verzeichnet sind. Für die Betrachtung der NUTS3 Originaldaten wird dieses Kriterium weitgehend nicht erfüllt.

4 Methodik

Lediglich ein Landkreis zeigt für die gesamten land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen mehr als zehn Monate mit Dürreauswirkungen (für DE132 liegen elf Monate mit $I_{LVW} > 0$ vor). Daher kann keine Korrelationsanalyse für die NUTS3 Originaldaten durchgeführt.

Bei Betrachtung der Korrelationszusammenhänge soll eine mögliche Verzögerung des Auftretens von Dürreauswirkungen nach dem Dürresignal der Dürreindizes überprüft werden. In der Literatur wurden in diesem Zusammenhang beispielsweise meteorologische Dürreindizes über mehrere Monate akkumuliert betrachtet (Beguería et al., 2014). Die monatlichen Bodenfeuchteindizes spiegeln je nach Wasseraustauschraten und je nach betrachteter Bodentiefe bereits das längerfristige Wasserdargebot wieder (siehe unten Kapitel „5.1 Zeitliche und räumliche Autokorrelation“). Eine Akkumulation dieser Werte über mehrere Monate ist daher nicht sinnvoll. Entsprechend werden in dieser Arbeit für die

landwirtschaftlichen sowie meteorologischen Dürreindizes einheitlich monatliche Mittelwerte betrachtet. Indem die Zeitreihen der Index- und Auswirkungszeitreihen gegeneinander verschoben mit einem Versatz von einem bis zwölf Monaten korreliert werden (siehe oberes Beispiel in Abbildung 14), wird der Zeitversatz mit dem am stärksten negativen Zusammenhang auf Clusterebene dieser Korrelationsvarianten ermittelt.

Zusätzlich soll ein Vergleich der Indexwerte über mehrere Monate durchgeführt und nur der minimale Indexwert innerhalb von drei beziehungsweise fünf Monaten um den Monat des Auswirkungszeitpunktes betrachtet und den jeweiligen Auswirkungen in der Korrelationsanalyse zugeordnet werden (siehe Beispiel in Abbildung 14). Diese Möglichkeit wird im ab hier mit „Minimumoption“ betitelt. Der Gedanke hinter dieser Zuordnungsmethode ist der, dass nicht bei allen EDII Einträgen genaue Zeitpunkte für Start und Ende der Dürreauswirkungen beschrieben werden. Diese Fehlinformationen können möglicherweise durch diese Zuordnungsart kompensiert werden. Hier gilt es abzuwägen, ob die Unsicherheiten dieser Zuordnungsart mit der erhofften Verstärkung der Korrelationszusammenhänge zu rechtfertigen ist.

Die Korrelationsstärke und Signifikanz wird zwischen allen vier Indizes und allen Dürreauswirkungsbereichen und für beide Skalierungsmethoden berechnet, sowie für jede NUTS3, für jeden möglichen Zeitversatz und jeden möglichen zu betrachtenden Zeitraum (einem, drei und fünf Monate um den in der EDII eingetragenen Monat der Dürreauswirkungen) bestimmt. Anschließend werden die Korrelationskoeffizienten r für die NUTS3 mit einem signifikanten Zusammenhang innerhalb eines Clusters zu einem

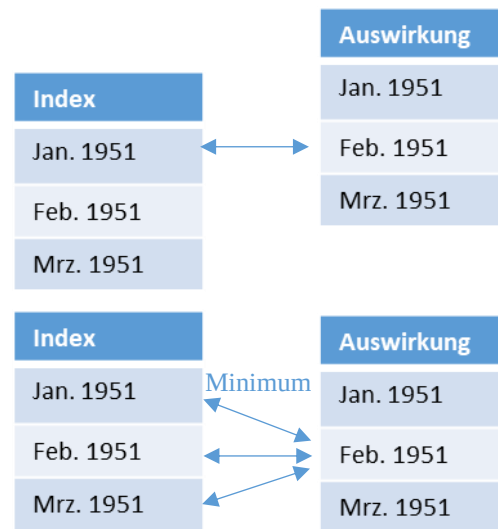


Abbildung 14: Korrelationsvarianten der Indizes mit Auswirkungen. Oben: Schema der Zuordnung des minimalen SMI über drei Monate; unten: Schema der Zuordnung des SMI zu Dürreauswirkungen bei einem Zeitversatz von einem Monat.

mittleren Korrelationskoeffizienten $\bar{R}$ gemittelt. Die Variante mit dem am stärksten negativen $\bar{R}$ werden als beste Korrelationsvariante des Clusters gewertet und deren Ergebnis in Karten visualisiert. Zwischen den verschiedenen Korrelationsvarianten soll dann abgewogen werden, welche Zuordnungsmethode von Index und Auswirkungen zur weiteren Durchführung von Analysen genutzt werden soll. Sowohl die Boxplotanalyse als auch die Grenzwertoptimierungskurven sollen mit diesen „besten“ Zuordnungsvarianten pro Index und Cluster nur für die NUTS3 mit signifikantem Zusammenhang durchgeführt werden.

Mit dieser Methodik wird eine Korrelationsanalyse wiederholt, wobei statt der Anzahl an Auswirkungen nun ein binärer Datensatz zum Auftreten von Auswirkungen (1 beim Auftreten von mindestens einer Dürreauswirkung und 0 wenn keine Wirkungsberichte vorliegen) genutzt wird. Dies soll Aufschluss darüber bringen, ob die Anzahl an EDII Einträgen als Maß für die Intensität von Dürreereignissen geeignet ist. Für die Korrelation von nicht normalverteilten kontinuierlichen Daten und kategorialen Daten können nach Dormann (2013) keine klassischen Korrelationsmethoden weder nach Pearson noch Spearman oder Kendall genutzt werden. Daher werden zuerst die Ränge der Dürreindizes über die Zeitreihen innerhalb eines jeden Landkreises bestimmt und im Anschluss eine biseriale Korrelation zu den binären Daten zum Auftreten von Dürre bestimmt (Dormann, 2013).

4.4 Boxplotanalyse

Die Schwellenwertanalyse soll über den empirischen Ansatz der Boxplotanalyse (Krzywinski und Altman, 2014) ermittelt werden. Dabei werden alle monatlichen Indexwerte betrachtet, die zu den Zeitpunkten des Auftretens von Dürreauswirkungen vorliegen. Als Grundlage dienen ein binärer Datensatz zu den Dürreauswirkungen der NUTS3 Originaldaten und ein binärer Datensatz zu den herunterskalierten Auswirkungsdaten. An dieser Stelle soll nochmals erwähnt werden, dass lediglich Landkreise betrachtet werden, für die in der Korrelationsanalyse ein signifikanter Zusammenhang ermittelt wurde und für die mehr als zehn Monate mit Dürreauswirkungen vorliegen. Unter Anwendung des in der Korrelationsanalyse ermittelten Zeitversatzes auf Clusterebene werden alle die Indexwerte von Monaten, für die mindestens eine Dürreauswirkung vorliegt, herausgeschrieben. So kann eine Liste von Indexwerten bei Auftreten von Dürreauswirkungen als Grundlage für die Boxplotanalyse ermittelt werden. Die Boxplotanalyse gibt für die NUTS3 sowohl die Mediane, die Quartile sowie Ausreißer der zu Grunde liegenden Werteverteilung aus. Aus diesen Ergebnissen sollen deutschlandweite Mittel der Mediane berechnet werden, die als potentielle neue Schwellenwerte dienen können (Bachmair et al., 2015; De Stefano et al., 2015). Hierbei sollen die deutschlandweiten Medianwerte bei Nutzung der herunterskalierten Auswirkungsdaten mit den Medianwerten bei ausschließlicher Nutzung der NUTS3 Originaldaten verglichen werden. Weiter sollen mittlere Charakteristiken wie mittlere Mediane und Quartile auf Clusterebene bestimmt werden. Diese sollen in Karten visualisiert werden, um eventuelle räumliche Muster detektieren zu können. Dabei werden die

4 Methodik

Medianwerte in Klassen 0.05-er Schritte (ab 0.1 beginnend) eingeordnet und farbig dargestellt. Die Farben wurden in Bezug zu den bisher genutzten Schwellenwert von 0.2 und der Vorwarnstufe von 0.3 gewählt. Liegt der Median der Cluster unter dem bisherigen Schwellenwert, so wird dies in einem Grünton dargestellt. Hier zeigt sich kein Bedarf, den Schwellenwert der Dürredefinition anhand der Dürreindizes zu erhöhen sondern möglicherweise zu erniedrigen. Liegt der Median der Cluster zwischen 0.2 und 0.3 wird dies durch einen Blauton signalisiert. Mediane, die über der Vorwarnstufe des Deutschen Dürremonitors liegen, werden aufsteigend durch gelb-orange-rote Farbstufungen visualisiert. Hier würden Dürreauswirkungen vermehrt in Monaten vorliegen, die im Deutschen Dürremonitor anhand der Definition durch den bisherigen Schwellenwert nicht als Dürre klassifiziert werden.

Generell gilt der Median als ein robuster Verteilungsparameter (Dormann, 2013). Das Konfidenzintervall des cluster- und indexspezifischen Medians soll näher über eine sogenannte „Leave-one-out“-Analyse und „Boostrapping“ betrachtet werden. Bei erst genannter Analyse wird jeweils ein Dürreindex aus der betrachteten Verteilung ausgeschlossen und der Median ohne jeweiligen Wert berechnet. Dies wird wiederholt, bis dass jeder Wert einmal aus der Verteilung herausgenommen wurde. Bei zweit genannter Methode wird (zweimal so häufig wie der Stichprobenumfang) wiederholt eine neue Stichprobe durch zufälliges Ziehen mit Zurücklegen aus der ursprünglichen Verteilung erstellt und der jeweilige Median ermittelt. Aus den so ermittelten Medianverteilungen kann das 95% Konfidenzintervall bestimmt und in den jeweiligen Boxplots visualisiert werden. So kann der Einfluss einzelner Ereignisse auf die Schwellenwerte bzw. die Verlässlichkeit der Mediane eingeschätzt werden.

4.5 ROC-Analyse

Eine probabilistische Methode zur Ermittlung idealer Schwellenwerte von kriteriumsorientierten Testwertinterpretationen ist die Grenzwertoptimierungskurve. Diese stammt aus dem Wissenschaftsfeld der Radar-Signaldetektion, wurde aber in naturwissenschaftlichen Studien bereits mehrfach angewendet (Blauhut et al., 2015; Mason und Graham, 2002; Stagge et al., 2015a). Diese Methode soll vor allem angewendet werden, um die Leistungsfähigkeit der Dürreindizes als Zeiger für das Auftreten von Dürreauswirkungen untereinander zu vergleichen. Mit dieser Methode kann zusätzlich ein „optimaler“ Schwellenwert im Hinblick auf die Maximierung von Spezifität und Sensitivität, das heißt im Umkehrschluss durch gleichzeitige Minimierung der Fehler 1. und 2. Art, bestimmt werden (Moosbrugger und Kelava, 2012) (siehe Tabelle 2 und Formel 5). Die Grenzwertoptimierungskurve ist ein graphisches Analyseverfahren, bei dem die zu Grunde liegende Grundgesamtheit keiner bestimmten Verteilung folgen muss und die Gruppengrößenverhältnisse unwichtig sind. Die einzige Voraussetzung zur Anwendung der Analyse ist, dass die Untergruppen repräsentativ für die Grundgesamtheit sein müssen und somit eine ausreichende Anzahl an Stichproben vorliegen muss (Moosbrugger und Kelava, 2012). Um dies zu gewährleisten werden die Grenzwertoptimierungskurven nicht auf Clusterebene sondern nur für gesamt Deutschland angewendet.

Tabelle 2: Schematische Darstellung der Fehlerarten und ihrer Wahrscheinlichkeiten (nach Moosbrugger und Kelava (2012)).

Annahme: Dürre tritt auf....		Dürreauswirkungen der EDII	
		Ja (mindestens eine Auswirkung)	Nein (keine Auswirkung)
Klassifikation anhand der Dürreindizes	Ja (Index ≤ Sw)	Richtig Positiv (RP)	Falsch Negativ (FN)
	Nein (Index > Sw)	Falsch Positiv (FP)	Richtig Negativ (RN)

Formel 5: Berechnung des Fehlers 1. Art, 2. Art, der Sensitivität sowie der Spezifität der Klassifikation von Dürre anhand Tabelle 2 (nach Moosbrugger und Kelava (2012)).

$$\alpha = \frac{FP}{FP + RN}$$

$$\beta = \frac{FN}{FN + RP}$$

$$\text{Sensitivität} = 1 - \beta$$

$$\text{Spezifität} = 1 - \alpha$$

α	Fehler 1. Art; Fehlalarmquote der Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []
FP	Anzahl falsch-positiver Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []
RN	Anzahl richtig-negativer Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []
β	Fehler 2. Art; Verpasserquote der Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []
FN	Anzahl falsch-negativer Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []
RP	Anzahl richtig-positiver Klassifikation entsprechend Tabelle 2
Sensitivität	Trefferquote der Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []
Spezifität	Quote des Falschen Alarms der Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []

Als Eingangsdaten werden hier, wie für die Boxplotanalyse auch, die binären Datensätze der Dürreauswirkungen für die herunterskalierten sowie der NUTS3 Originaldaten genutzt. Im Gegensatz zu der Boxplotanalyse werden zu Erstellung der Grenzwertoptimierungskurven nicht nur die Indexwerte bei Auftreten von Dürreauswirkungen, sondern auch die Indexwerte für die Monate ohne Auftreten von Dürreauswirkungen betrachtet. Anhand dessen wird für jeden potentiellen Schwellenwert (bei dem größtmöglichen Wert beginnend) die Sensitivität und Spezifität berechnet und gegeneinander aufgetragen. Diese Darstellung wird Grenzwertoptimierungskurve (engl: Receiver Operating Characteristic Curve; ab hier: ROC) genannt. Im Verlauf der ROC verringert sich die Sensitivität zu Gunsten der Spezifität (siehe Abbildung 15). An dem Kurvenverlauf kann man erkennen, wie gut der genutzte Index geeignet ist, um Dürreauswirkungen vorherzusagen. Ein Verlauf der Kurve auf der Hauptdiagonalen würde signalisieren, dass die Kategorisierung anhand des Index für alle Schwellenwerte der

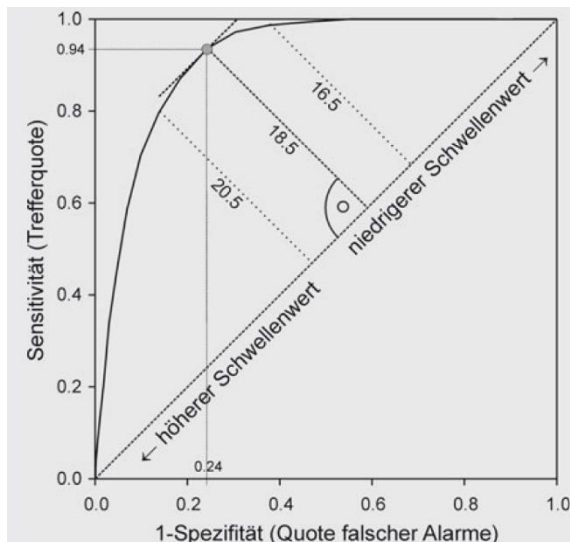


Abbildung 15: Beispielhafte Skizze einer ROC. Bei einem Schwellenwert von 18.5 wird der maximale Abstand zur Hauptdiagonalen erreicht; zur Illustration sind zusätzlich die Projektionen eingezeichnet, die sich jeweils für einen niedrigeren (16.5) und einen höheren (20.5) Schwellenwert ergeben würden (entnommen aus Moosbrugger und Kelava, (2012)).

zufälligen Vorhersage entsprechen würde. Je weiter die Kurve über der Hauptdiagonalen verläuft, umso besser ist der Index zur Auftretsvorhersage von Dürre geeignet (Hanley, James, A. und McNeil, Barbara, J., 1982; Moosbrugger und Kelava, 2012). Daher kann die Fläche unter der Kurve (engl.: Area Under Curve; ab hier: AUC) als Abschätzung genutzt werden, wie zweckmäßig der betrachtete Index zur Vorhersage des untersuchten Prozesses ist. Anhand der AUC soll also eine Beurteilung der hier untersuchten Indizes (dem $SMI_{0.25}$, $SMI_{1.8}$, $SPEI_a$ und $SPEI_p$) als Zeiger für das Auftreten von Dürreauswirkungen in den einzelnen Sektoren durchgeführt werden. Je höher der AUC-Wert von 50 % abweicht, umso besser ist der Dürreindex als Zeiger für das Auftreten von Auswirkungen geeignet.

Der optimale Schwellenwert pro Index kann rechnerisch über die Maximierung des Youden Index entsprechend Formel 6 ermittelt werden. Visuell ist das der Schnittpunkt der ROC mit dem Lot der Hauptdiagonalen, bei dem das Lot den größten Abstand aufweist bzw. der Punkt der ROC-Kurve an dem die Kurventangente parallel zur Hauptdiagonalen verläuft (siehe Abbildung 15). Bis zu diesem Punkt nimmt die Sensitivität im Verhältnis zur Spezifitätsminderung (Erhöhung des Fehlers 1. Art) bei Senkung des Schwellenwertes stark zu (bzw. der Fehler 2. Art stark ab). Beim so ermittelten Schwellenwert ist ein optimales Gleichgewicht zwischen Sensitivität und Spezifität und somit der beiden Fehlerarten hergestellt. Bei weiterer Absenkung des Schwellenwertes nimmt die Spezifität schneller ab (der Fehler 1. Art schneller zu) als die Sensitivität zunimmt (bzw. der Fehler 2. Art abnimmt). Daher ist von einem weiteren Absenken des Schwellenwertes abzuraten (Moosbrugger und Kelava, 2012). Die Beurteilung, in wie weit die neu ermittelten indexspezifischen deutschlandweiten Schwellenwerte aus der ROC-Analyse als auch der Boxplotanalyse im Vergleich zum bisherigen Schwellenwert von 0.2 das Auftreten von Dürreauswirkungen für die Land- und Viehwirtschaft sowie auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkung für alle Landkreise Deutschlands (auch ohne signifikanten Korrelationszusammenhang) erfassen, soll über die Fehler 1. und 2. Art evaluiert werden.

Formel 6: Berechnung des Youden Index anhand der ROC Kurve (Youden, 1950).

$$\text{Youden Index} = \text{Sensitivität} + \text{Spezifität} - 1$$

Youden Index Zielunktion zur Schwellenwertoptimierung mit ROC-Analyse []

Sensitivität Trefferquote der Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []

Spezifität Quote des Falschen Alarms der Klassifikation entsprechend Tabelle 2 []

5 Ergebnisse

5.1 Zeitliche und räumliche Autokorrelation der Dürreindizes

Zur näheren Betrachtung der Dürreindizes $SMI_{1,8}$, $SMI_{0,25}$, $SPEI_a$ und $SPEI_p$ wurden die zeitlichen Autokorrelationen für alle 439 Landkreise Deutschlands bestimmt. Für die Dürreindizes lässt sich dabei keine eindeutige Saisonabhängigkeit, also kein Jahresgang der Anomalien erkennen. Für die Bodenfeuchteindizes werden Autokorrelationen für aufeinander folgende Monate ersichtlich. Der Gesamtboden zeigt hierbei Abhängigkeiten der Anomalie von den vorhergehenden Monaten bis hin zu teilweise über einem Jahr auf. Für den Oberboden lassen sich Abhängigkeiten der Werte von den Vormonate bis mehr als einem Quartal erkennen. Dieser Effekt ist bei den meteorologischen Dürreindizes nicht zu erkennen. Die klimatischen Wasserbilanzen sind unabhängig von den Anomalien der Vormonate. Beispielhaft für die Ergebnisse der zeitlichen Autokorrelation aller NUTS3 sind in Abbildung 16 die Ergebnisse für den Landkreis von Freiburg im Breisgau (DE131) dargestellt.

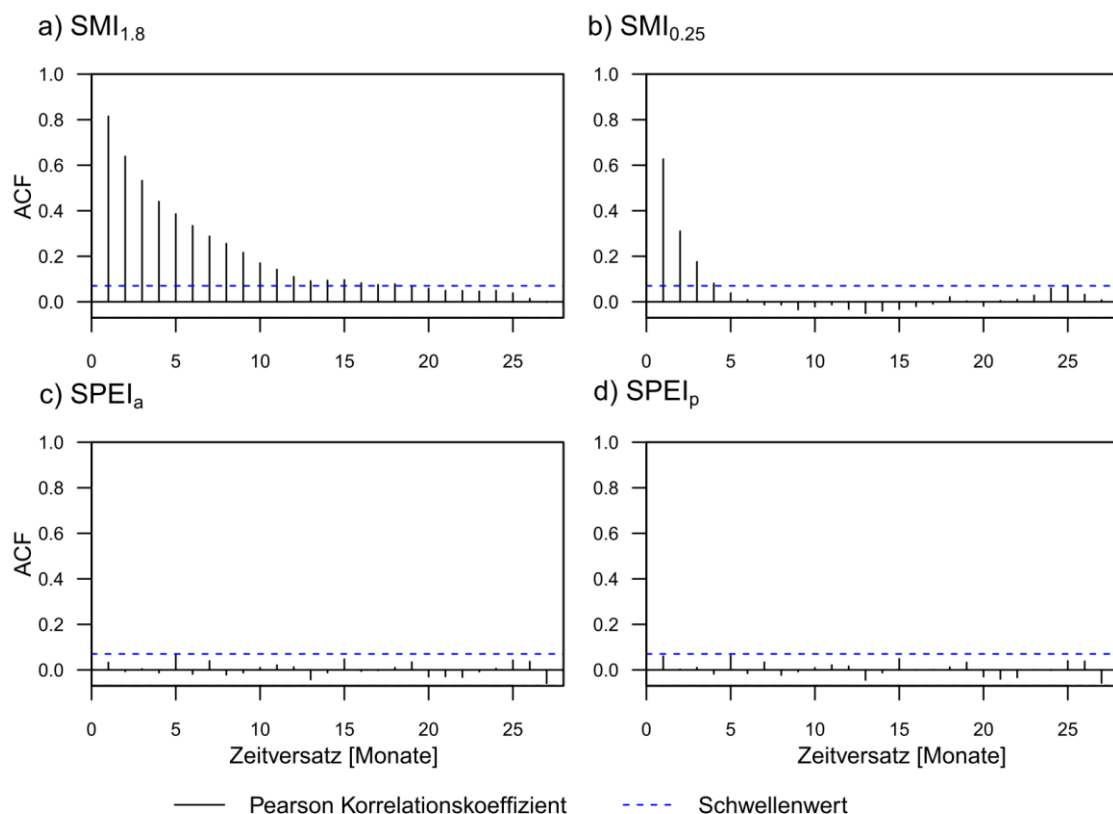


Abbildung 16: Zeitliche Autokorrelation des Landkreises Freiburg im Breisgau (DE131) dargestellt anhand des Autokorrelationskoeffizienten (ACF []) gegen den Zeitversatz [Monaten] für die verschiedenen Dürreindizes.

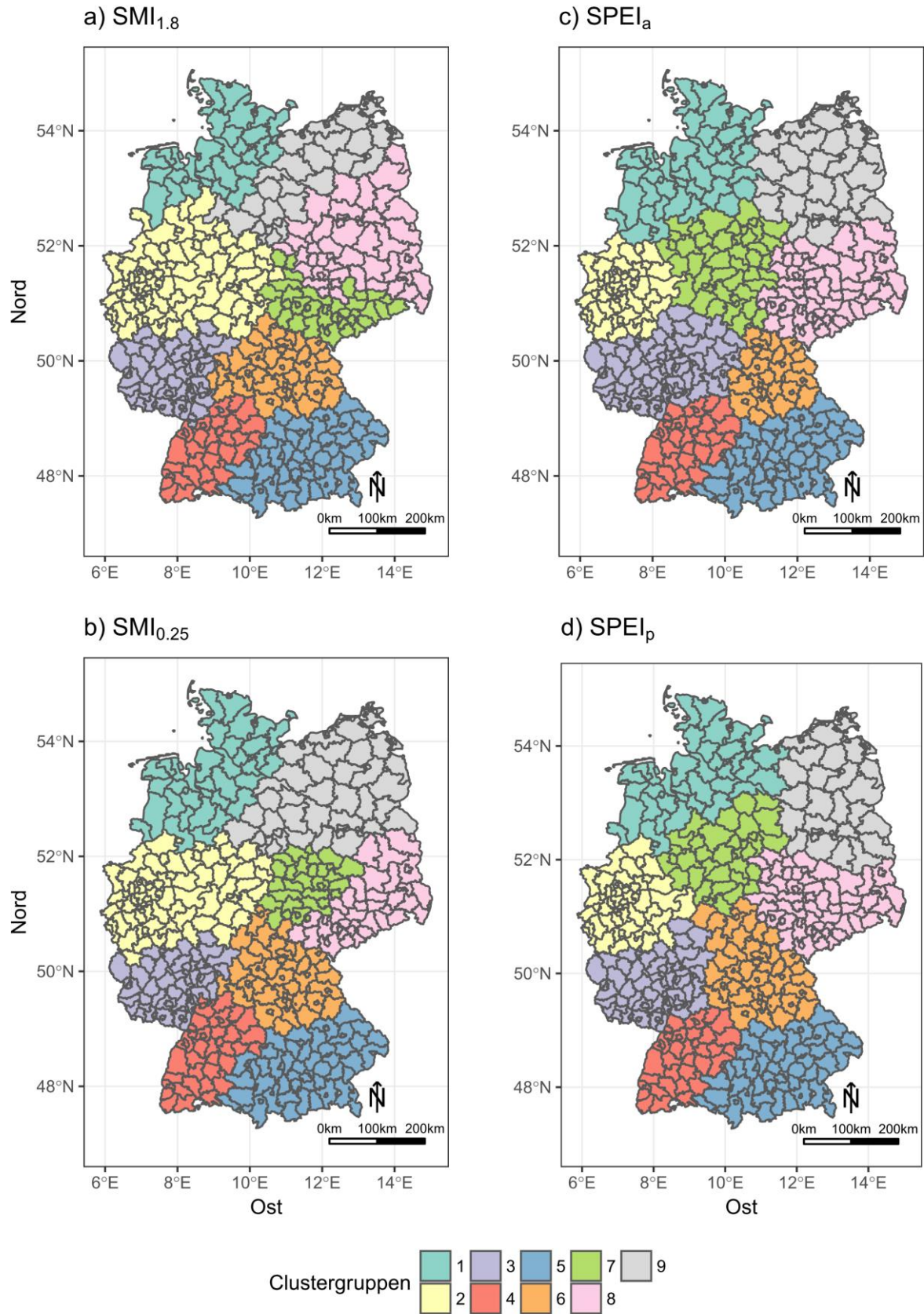


Abbildung 17: Karte der NUTS3 eingeteilt in Clustergruppen (vereinheitlicht nummeriert) pro untersuchtem Dürreindex als Ergebnis der Clusteranalyse mit Hilfe der Mclust Funktion (Fraley und Raftery, 2007).

Neben der zeitlichen Korrelation wurde die räumliche Korrelation der Landkreise untereinander für jeweilige Zeitreihen der Dürreindizes überprüft. Hierbei ergeben sich teilweise stark positive und hochsignifikante Korrelationszusammenhänge von über 0.9. Um die räumlich Lage ähnlich ausgeprägter NUTS3 zueinander zu ermitteln, wurde für alle Dürreindizes Clusteranalysen durchgeführt. Übersichtshalber wurden die Cluster mit einer Nummerierung benannt (siehe Abbildung 17). Vergleicht man die Cluster der einzelnen Indizes untereinander, so ergeben sich ähnliche Zuordnungen der NUTS3 zu jeweiligen Gruppen. Es wird deutlich, dass die Landkreise ähnlicher Indexausprägungen für alle Dürreindizes räumlich gruppiert auftreten. Anhand dieser Clustergruppen werden die Ergebnisse folgender Analysen für die darin liegenden NUTS3 jeweils gemittelt, um räumliche Muster in den Ergebnissen der Korrelations- und Schwellenwertanalysen zu untersuchen.

5.2 Zusammenhang von Dürreindizes und -auswirkungen

5.2.1 Beziehung zwischen Trockenheit und der Anzahl an Dürreauswirkungen der Land- und Viehwirtschaft I_{LVW}

5.2.1.1 Betrachtung des gesamten land- und viehwirtschaftlichen Sektors

Zu Beginn der Arbeit wurden die Daten der Dürreauswirkungen aller relativ geringer aufgelösten Ebenen (deutschlandweit, NUTS1 und NUTS2) auf die NUTS3 Ebene herunterskaliert. Die Skalierung wurde mit und ohne Flächengewichtung für die Auswirkungsbereiche I_{LVW} , I_{CL} , I_{RLVW} und I_R durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den vier untersuchten Indizes und der Anzahl an Dürreauswirkungen pro betrachtetem Auswirkungsbereich dargelegt. Zu Beginn werden die Ergebnisse für Dürreauswirkungen der gesamten Land- und Viehwirtschaft I_{LVW} , dann für die Auswirkungen der CORINE Landnutzungsklasse 2.1.1 entsprechenden Auswirkungen I_{CL} und den Auswirkungen der restlichen Kategorien der CORINE Landnutzungsklasse 2.1.1 I_{RLVW} unterteilt. Schließlich werden die Korrelationsergebnisse zu der Anzahl hydrologischer Dürreauswirkungen I_R betrachtet.

Abbildung 18 visualisiert die Ergebnisse der besten Korrelationsvarianten für den gesamten Sektor der Land- und Viehwirtschaft pro Cluster anhand der gemittelten Korrelationsstärke $\bar{R}$ aller Korrelationskoeffizienten r der Landkreise mit signifikantem Zusammenhang. Landkreise ohne signifikanten Zusammenhang treten gehäuft für den Nordosten und weniger im Westen Deutschlands auf. Die südlich in Deutschland befindlichen NUTS3 zeigen flächenhaft signifikante Korrelationszusammenhänge. Mittlere Korrelationsstärken wurden jeweils unter allen Korrelationsergebnissen mit einem Zeitversatz von keinem bis zwölf Monaten ohne Betrachtung des Indexminimums über einen Zeitraum mehrerer Monate (also ohne Minimumoption) verglichen. Für alle vier Indizes stellt sich heraus, dass der am stärksten negative Zusammenhang auf Clusterebene fast ausschließlich ohne einen Zeitversatz oder mit einem Zeitversatz von lediglich einem Monat vorhanden ist. Für den hier betrachteten Zusammenhang liegt also weitestgehend kein Zeitversatz zwischen der Intensivierung der Trockenheit und der Zunahme der Anzahl von Dürreauswirkungen vor.

5 Ergebnisse

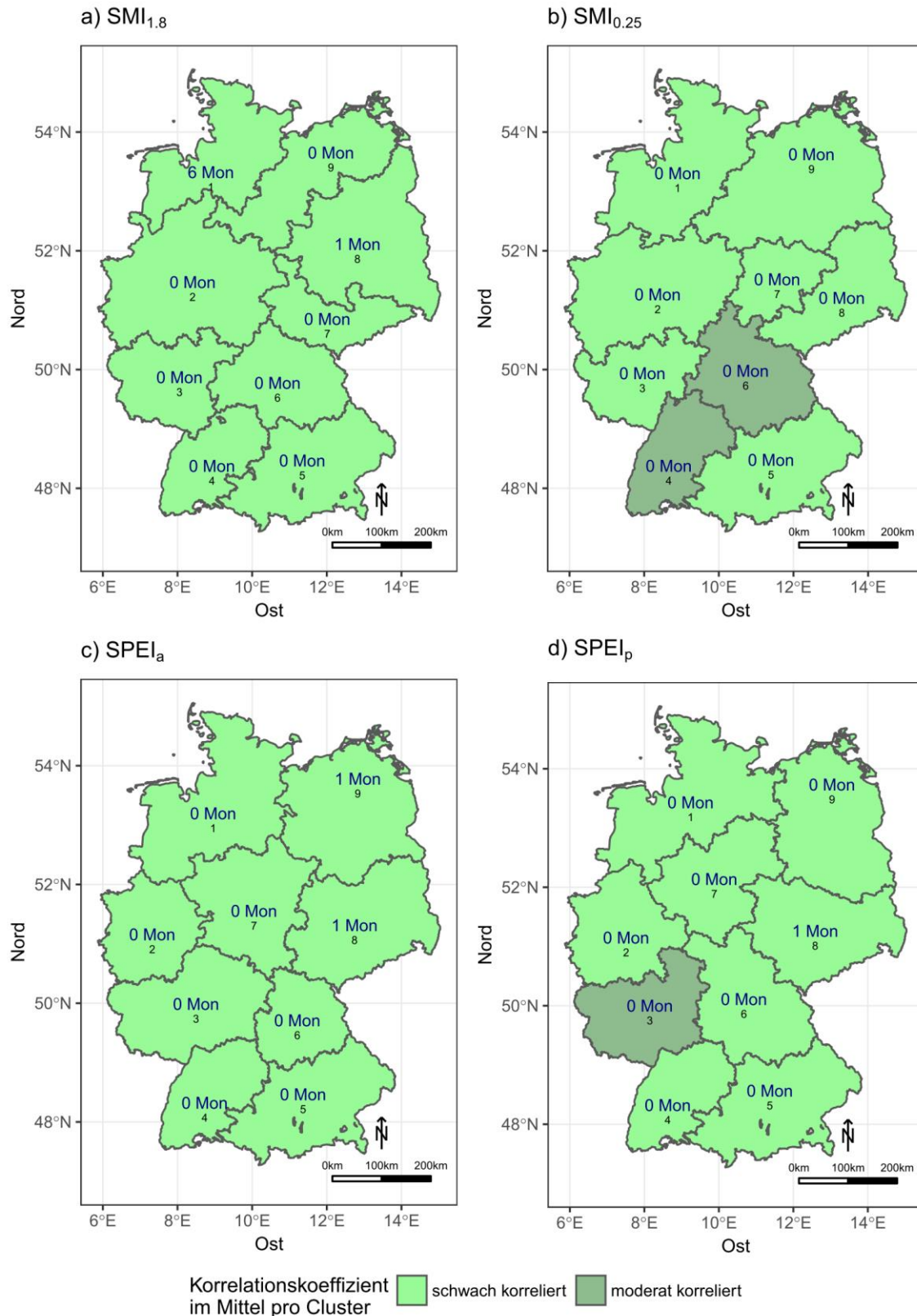


Abbildung 18: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und **der Anzahl ohne Flächengewichtung skalierten land- und viehwirtschaftlicher Dürreauswirkungen I_{LWV} ohne Minimumoption**. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkennlich.

Einzige Ausnahme ist hier das Cluster Nummer 1 bei Betrachtung des Bodenfeuchteindex des Gesamtbodens. Weiter kann für alle Cluster bei allen vier Indizes eine im Mittel schwach bis moderat negative Korrelation beobachtet werden. Es wird deutlich, dass es einen negativen Zusammenhang zwischen der Trockenheitsanomalie und der Anzahl an Auswirkungen für Land- und Viehwirtschaft gibt. Weiter wird aus der Abbildung 18 ersichtlich, dass die Korrelationszusammenhänge für den $SMI_{0,25}$ und den $SPEI_p$ für einzelne Cluster mit moderater Korrelation stärker sind als für den $SMI_{1,8}$ und den $SPEI_a$. Der $SPEI_a$ weist die geringsten negativen Korrelationskoeffizienten im Vergleich zu den anderen betrachteten Dürreindizes auf und zeigt die höchste Anzahl nicht signifikanter Zusammenhänge auf NUTS3 Ebene.

Die Abbildung 18 steht repräsentativ für die Korrelationsergebnisse bei Nutzung der herunterskalierten Dürreauswirkungsdaten sowohl mit als auch ohne Flächengewichtung. Während auf NUTS3 Ebene geringfügige Unterschiede auftreten, unterscheidet sich die Einteilung in Korrelationsklassen auf der Clusterebene zwischen den beiden Skalierungsmethoden nicht. Im Mittel für alle NUTS3 Deutschlands (mit signifikanter Korrelation) unterscheiden sich die Korrelationskoeffizienten über alle Indizes und Cluster gemittelt auf die dritte Kommastelle gerundet nicht. Für die flächengewichtete Skalierung und die nicht flächengewichtete Skalierung ergibt sich ein deutschlandweiter, indexunspezifischer mittlerer Korrelationskoeffizient von -0.226 (siehe Tabelle 3). Die wenigen Ausnahmen, in denen ein Zeitversatz als beste Korrelationsvariante auftritt, unterscheiden sich jedoch von der Korrelationsvariante ohne). Hier wird vorweggenommen, dass alle in dieser Arbeit überprüften Korrelationszusammenhänge für den land- und viehwirtschaftlichen Sektor zwischen den beiden Skalierungsmethoden nur geringfügig verschiedene Ergebnisse aufweisen. Die Einteilung von $\bar{R}$ in die Klassen der Korrelationsstärke für die einzelnen Cluster ist für alle Indizes und jegliche Betrachtung der Bereiche für Land- und Viehwirtschaft identisch. Nur in vereinzelt Fällen wird ein unterschiedlicher Zeitversatz für die stärksten negativen Zusammenhänge ermittelt. Insgesamt werden im deutschlandweiten Mittel geringfügig stärker negative Korrelationen zu Gunsten der Skalierung ohne Flächengewichtung für die Korrelation ohne Minimumoption beobachtet (siehe Tabelle 3). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird daher bei Betrachtung der land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen mit jeweiligen Untergruppen ausschließlich mit den skalierten Dürreauswirkungsdaten ohne Flächengewichtung gearbeitet.

Die bisher beschriebenen Ergebnisse resultieren aus der Betrachtung der Korrelationen mit einem Zeitversatz von einem bis zwölf Monaten bei direkter Zuordnung ohne der Option, den Dürreauswirkungen die minimalen Indexwerte über einen mehrmonatigen Zeitraum zuzuordnen. Betrachtet man die Korrelationsergebnisse mit dem minimalen Dürreindexwert über eine Zeitspanne von keinem bis zwei Monaten vor und nach dem Eintrag der Dürreauswirkungen, so ergeben sich für die Betrachtung auf Clusterebene die in Abbildung 19 dargestellten Korrelationskoeffizienten und Zeitversätze. In den meisten Fällen wird hier bestätigt, dass der Zusammenhang der Daten ohne Zeitversatz die am stärksten negativ korrelierten Ergebnisse erzielt. Die wenigen Ausnahmen, in denen ein Zeitversatz als beste

5 Ergebnisse

Korrelationsvariante auftritt, unterscheiden sich jedoch von der Korrelationsvariante ohne Minimumoption. Hier sind die nordöstlichen Cluster bei Betrachtung des SPEI_a mit einem zehnmonatigen Versatz bemerkenswert. Es ist weiter auffällig, dass die Korrelationsstärke in diesen Fällen weiterhin nur als schwache Korrelation klassifiziert werden. Für die restlichen Cluster und die anderen Indizes ergeben sich im Mittel auch fast ausschließlich schwache Korrelationszusammenhänge. Lediglich in einem Fall kann eine Einteilung in eine stärkere Korrelationsklasse im Vergleich zur Korrelation ohne Minimumoption beobachtet werden. Das Resultat mit Minimumoption ist also nur geringfügig stärker negativ korreliert als die Korrelationsergebnisse mit direkter Zuordnungsmethodik. Hier kann nochmals vorweggenommen werden, dass für die Betrachtung der Korrelationen von Indizes zu den Auswirkungen I_{CL} und I_{RLVW} mit und ohne Betrachtung der Minimumoption gleichermaßen nur geringfügig höhere Korrelationen ergeben. Die deutschlandweit gemittelten Korrelationsstärken beider Varianten unterscheiden sich kaum für beide Skalierungsmethoden (vgl. Tabelle 3). Da die Optimierung der Korrelationszusammenhänge nur minimal im Vergleich zur Zunahme von Unsicherheiten bei Nutzung der Minimumoption ist, werden im Weiteren nur die Ergebnisse mit direkter Zuordnungsmethodik dargestellt, erörtert und in der Schwellenwertanalyse betrachtet.

Tabelle 3: Deutschlandweite, indexunspezifische mittlere Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Zuordnungsvarianten entsprechend Kapitel „4.3 Korrelationsanalyse“ zwischen Dürreauswirkungen der verschiedenen Wirkungsbereiche und den Dürreindizes SMI_{1.8}, SMI_{0.25}, SPEI_a und SPEI_p.

Zuordnungsmethodik	Anzahl an Auswirkungen ~ Dürreindizes					Auftreten von Auswirkungen ~ Dürreindizes
	Minimumoption	nicht angewandt		angewandt		nicht angewandt
	Skalieren der Auswirkungsdaten ... Flächengewichtung	ohne	mit	ohne	mit	(bei beiden Varianten gleich)
Auswirkungsbereich	LVW	-0.226	-0.226	-0.247	-0.247	-0.280
	CL	-0.243	-0.242	-0.265	-0.267	
	RLVW	-0.213	-0.212	-0.238	-0.238	
	R	-0.303	-0.302	-0.359	-0.364	-0.305

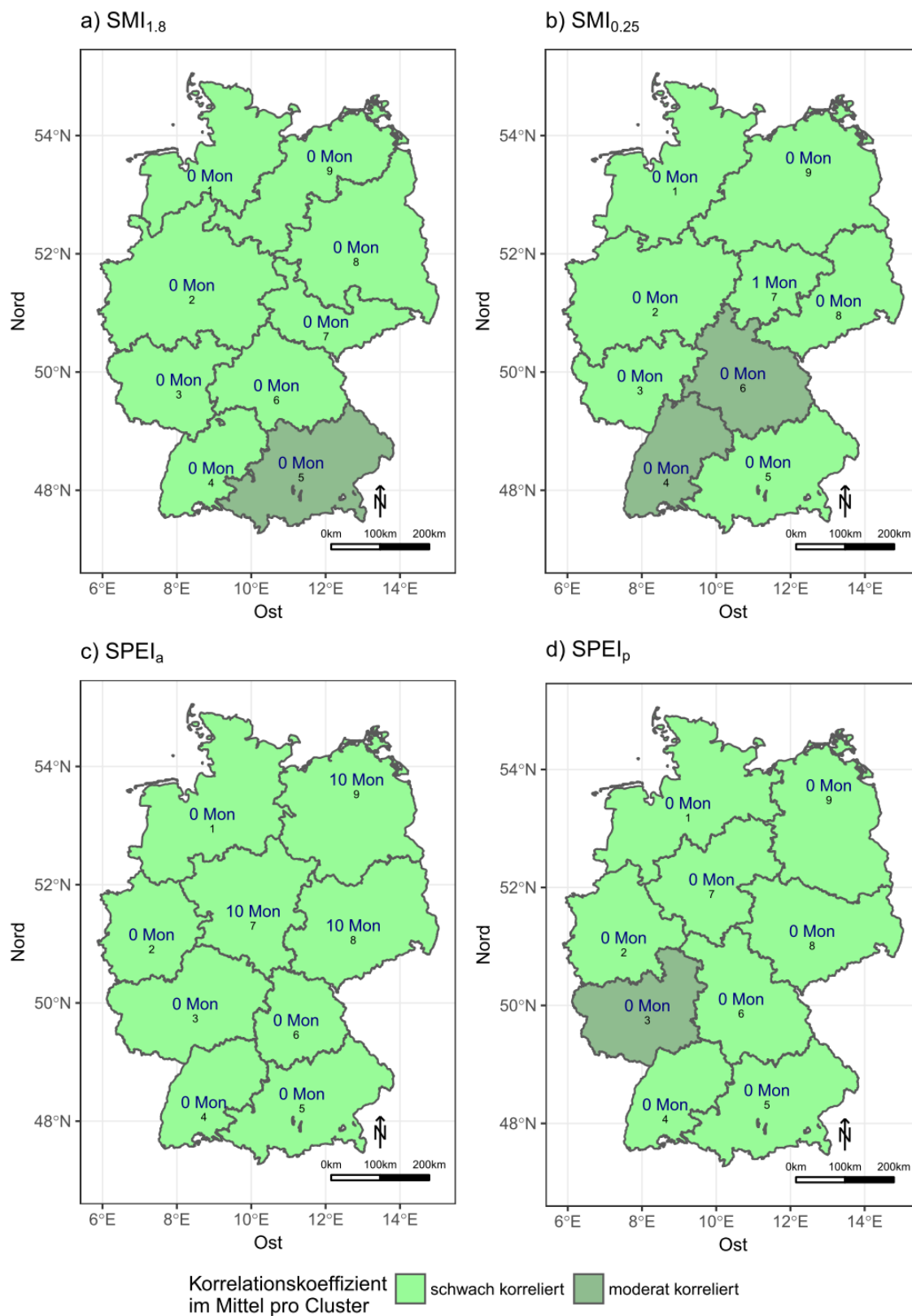


Abbildung 19: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und **der Anzahl ohne Flächengewichtung skalierten land- und viehwirtschaftlicher Dürreauswirkungen I_{LVW} mit Minimumoption**. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkennlich.

5 Ergebnisse

5.2.1.2 Betrachtung der Land- und Viehwirtschaft unterteilt nach Landnutzung

Die Dürreindizes wurden allesamt für die Flächen berechnet, die der CORINE Landnutzungs-kategorie 2.1.1, der nicht bewässerten Ackerfläche einjähriger Kulturen zugeordnet werden. Im Folgenden werden daher die Korrelationen der Dürreindizes mit den Dürreauswirkungen der Land- und Viehwirtschaft unterteilt in Dürreauswirkungen dieser Landnutzung entsprechend (I_{CL}) und zu den restlichen land- und viehwirtschaftlichen Auswirkungen (I_{RLVW}) vergleichend betrachtet.

Wie bereits bei der Korrelation der gesamten land- und viehwirtschaftlichen Auswirkungen, zeigt sich bei der Korrelation der Auswirkungen der nicht bewässerten Ackerflächen mit einjähriger Anbaufrucht I_{CL} , dass der Zusammenhang der Auswirkungsanzahl zu den einzelnen Dürreindizes für die meisten Clusterregionen ohne einen Zeitversatz oder mit einem Zeitversatz von einem Monat die stärksten negativen Zusammenhänge aufweist (vgl. Abbildung 20). Lediglich Cluster Nummer 1 sticht wiederholt mit einem mehrmonatigen Zeitversatz für den Zusammenhang zum $SMI_{1.8}$ hervor. Es wird weiter deutlich, dass Dürreindizes und Anzahl der Dürreauswirkungen in den südlichen Bereichen Deutschlands stärker korrelieren als die nördlich gelegenen Clusterregionen. Auf NUTS3 Ebene sind nicht signifikante Zusammenhänge besonders in den nördlichen Cluster zu finden und der $SPEI_a$ weist die höchste Anzahl nicht signifikanter Zusammenhänge auf. Zusätzlich ist die Clusteranzahl mit im Mittel moderater Korrelation für den $SMI_{0.25}$ und den $SPEI_p$ höher als für den $SMI_{1.8}$ und den $SPEI_a$. Im gesamten Durchschnitt ist der Korrelationskoeffizient zwischen Auswirkungen auf nicht bewässertem Ackerland und dem $SMI_{0.25}$ bzw. dem $SPEI_p$ - 0.26. Die mittlere Korrelationsstärke für Gesamtdeutschland zum $SMI_{1.8}$ und $SPEI_a$ beträgt bei beiden Indizes - 0.22. Der $SMI_{1.8}$ zeigt in diesem Fall ein Cluster mit moderater Korrelation. Folglich kann eine geringe Verstärkung der Korrelation bei separater Betrachtung der I_{CL} im Vergleich zur vorhergehenden Betrachtung der I_{LVW} erzielt werden. Nun wird der Zusammenhang der Indizes zu den Auswirkungen der restlichen Kategorien der Land- und Viehwirtschaft überprüft, die sich auf Dauerkulturen, Grünland und heterogene landwirtschaftliche Flächen beziehen. Hier lassen sich generell weniger starke Korrelationen erkennen (geringere Anzahl an NUTS3 mit signifikantem Zusammenhang sowie geringere Korrelationskoeffizienten). Abbildung 21 stellt die mittleren Korrelationsstärken $\bar{R}$ der einzelnen Cluster für die vier Indizes und die Dürreauswirkungen I_{RLVW} dar. Bezüglich der Korrelationskoeffizienten sind im Mittel ausschließlich schwache Korrelationen für alle Cluster mit den bisher am wenigsten negativen Korrelationskoeffizienten zu erkennen. Auf NUTS3 Ebene gibt es hier eine hohe Anzahl an Landkreisen ohne signifikanten Zusammenhang und teilweise sind vereinzelte NUTS3 positiv moderat mit den jeweiligen Indizes korreliert. Auffallend ist, dass die meisten Korrelationsvarianten, die bei diesem Wirkungsbereich die besten Ergebnisse erzielen, (sowohl mit als auch) ohne Minimumoption verstärkt höhere Zeitversätze für alle vier Indizes aufweisen. Vor allem die Bodenfeuchteindizes $SMI_{1.8}$ und $SMI_{0.25}$ zeigen Zeitversätze in fast allen Clustern von fünf bis zwölf Monaten. Die Niederschlags-Evapotranspirationsindizes weisen höhere Zeitversätze lediglich für den $SPEI_a$ in den (nord-) östlichen Gebieten auf. Im Südwesten werden die besten Korrelationsvarianten

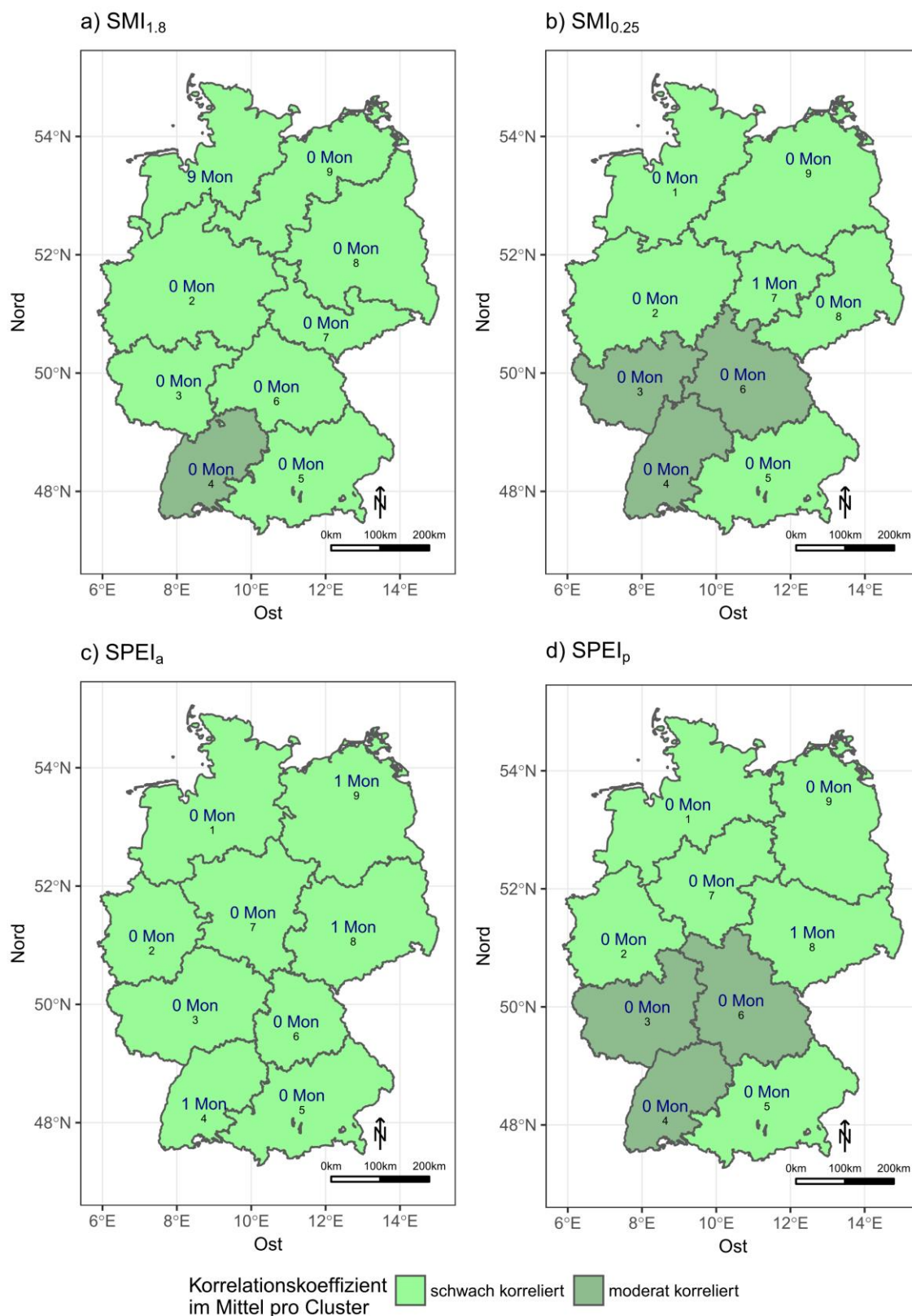


Abbildung 20: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und der Anzahl ohne Flächengewichtung skalierten land- und viehwirtschaftlicher Dürreauswirkungen ausschließlich der CORINE Landnutzungsklasse 2.1.1 entsprechend Dürreauswirkungen I_{CL} ohne Minimumoption. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkennlich.

5 Ergebnisse

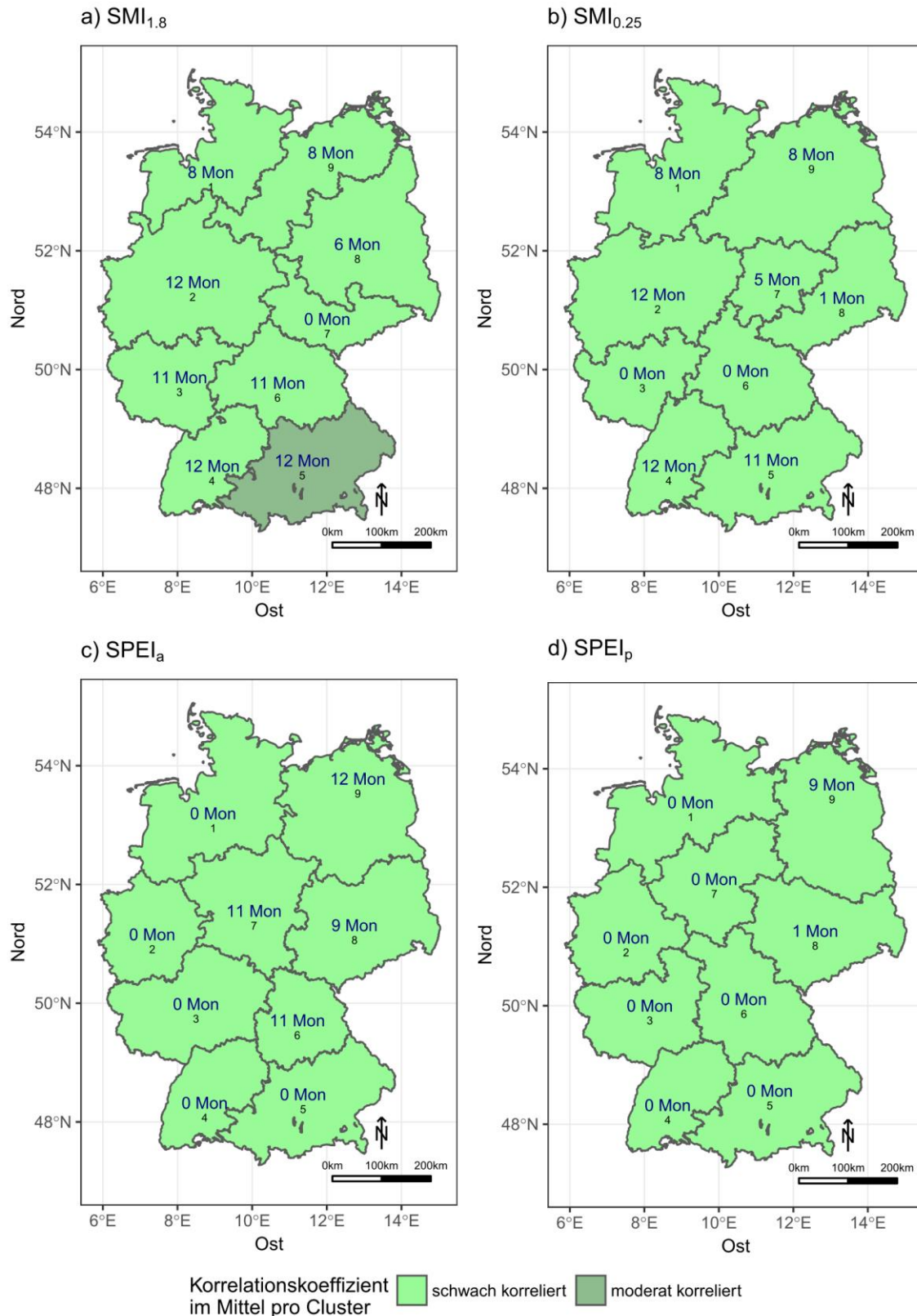


Abbildung 21: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und **der Anzahl ohne Flächengewichtung skalierten land- und viehwirtschaftlicher Dürreauswirkungen exklusive der CORINE Landnutzung 2.1.1 entsprechenden Dürreauswirkungen I_{RLVW} ohne Minimumoption**. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkennlich.

ohne Zeitversatz ermittelt. Für den SPEI_p liegt nur ein Cluster mit einem mehrmonatigen Zeitversatz vor. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse aufgeteilt nach Auswirkungen verschiedener Landnutzungsklassen weisen also deutliche Unterschiede auf. Bei einer geringeren Anzahl signifikanter Zusammenhänge und schwächeren Korrelationszusammenhängen kann besonders für die Bodenfeuchteindizes ein Zeitversatz zwischen dem Dürresignal der Dürreindizes und der Anzahl an Dürreauswirkungen für Dauerkulturen, Grünland und heterogene landwirtschaftliche Flächen identifiziert werden. Fasst man die bis hierhin erzielten Ergebnisse zusammen, so kann geschlussfolgert werden, dass es einen negativen Zusammenhang zwischen den Dürreindizes SMI_{1.8}, SMI_{0.25}, SPEI_a und SPEI_p und der Anzahl an Dürreauswirkungen der gesamten Land- und Viehwirtschaft, sowie der Anzahl an Auswirkungen unterteilt in verschiedene Landnutzungsklassen gibt. Die Stärke der mittleren Korrelationen auf Clusterebene ist schwach oder moderat. Hier kann ein räumlicher Trend zunehmender Korrelationsstärke in den Süden festgestellt werden (abnehmende Korrelationskoeffizienten und zunehmende Anzahl signifikanter Zusammenhänge). Der SPEI_a weist stets die schwächsten Korrelationszusammenhänge auf (höchste Anzahl nicht signifikanter NUTS3 und am wenigsten negative Korrelationskoeffizienten). Während für I_{LVW} und I_{CL} kaum ein Zeitversatz zwischen dem Dürresignal der Indizes und der Anzahl an Dürreauswirkungen beobachtet werden kann, ist der Zeitversatz für viele Bereiche Deutschlands bei Betrachtung des Zusammenhanges besonders von Bodenfeuchteindizes zu I_{RLVW} höher.

5.2.2 Beziehung zwischen Trockenheit und der Anzahl an auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R

Neben der Land- und Viehwirtschaft wurde der Zusammenhang von meteorologischen und landwirtschaftlichen Dürreindizes zur hydrologischen Dürre geprüft, indem auch der Korrelationszusammenhang zur Anzahl an auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen betrachtet wurde. Vergleicht man die Skalierungsmethoden der Dürreauswirkungsdaten, treten sowohl mit als auch ohne Minimumoption Fälle auf, in denen einzelne Cluster in unterschiedliche Korrelationsstärkeklassen eingeteilt werden. Der Zeitversatz für die jeweiligen Varianten mit und ohne Minimumoption sind für beide Skalierungsmethoden bis auf einem Fall identisch. Gleichzeitig sind die Korrelationsstärken im Mittel für die Skalierungsmethode ohne Flächengewichtung stärker. Daher soll im Weiteren nur diese Skalierungsmethode betrachtet werden.

Für auf Abflussmengen bezogene Dürreauswirkungen ergibt sich aus der Korrelation zu den Dürreindizes ein stärker ambivalentes Ergebnis bezüglich der Korrelationskoeffizienten. Der Unterschied der Korrelationsvarianten mit und ohne Minimumoption ist im Vergleich zu vorhergehenden Ergebnissen höher, liegt aber auch hier in einem ähnlichen Größenbereich (-0.30 bzw. -0.36 siehe Tabelle 3). Die wenigen Ausnahmen, in denen ein Zeitversatz als beste Korrelationsvariante auftritt, unterscheiden sich jedoch von der Korrelationsvariante ohne). Die Ergebnisse beider Korrelationsvarianten für die ohne

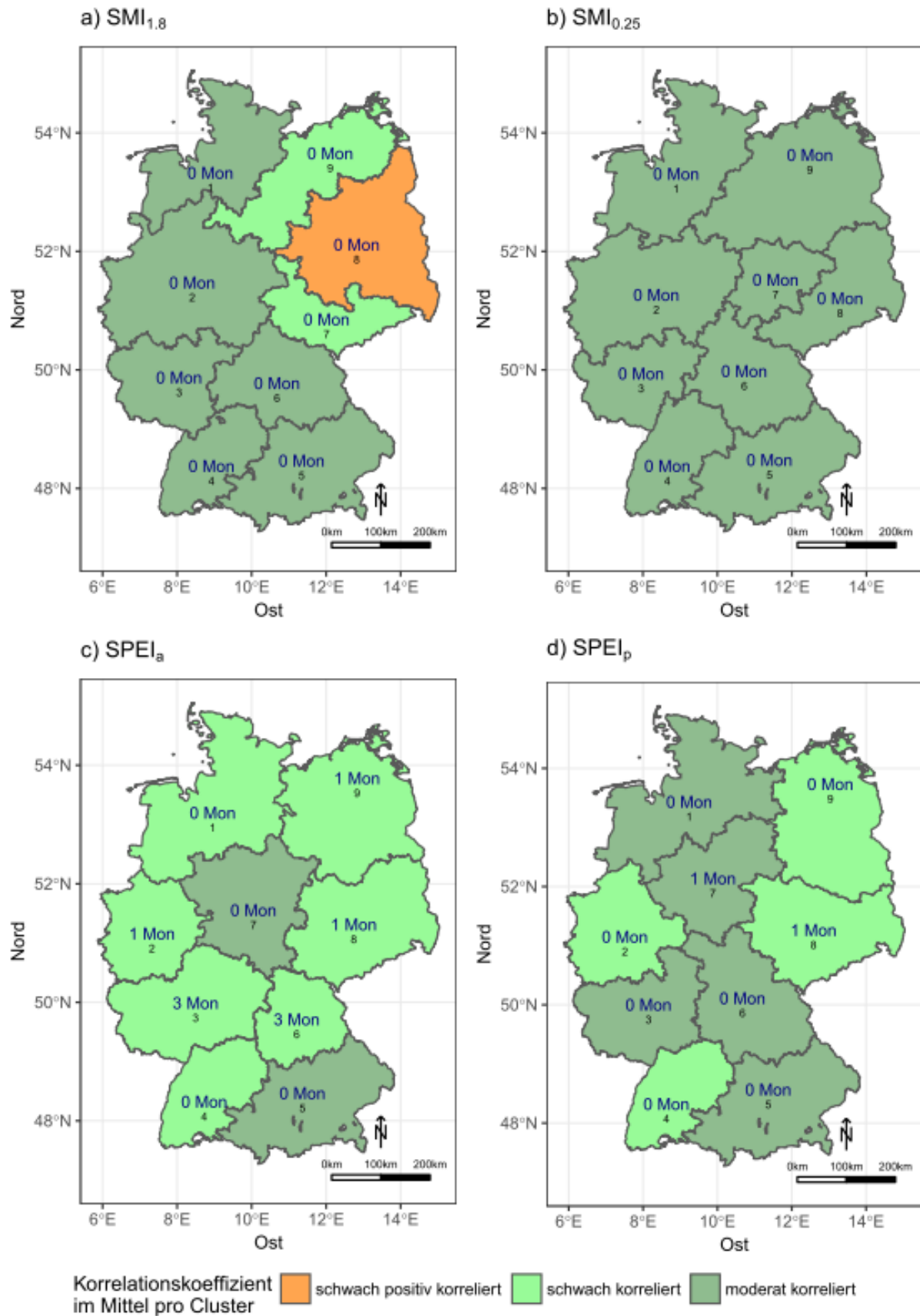


Abbildung 22: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und **der Anzahl ohne Flächengewichtung skalierten auf Abflussmengen bezogener Dürreauswirkungen I_R ohne Minimumoption**. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkennlich.

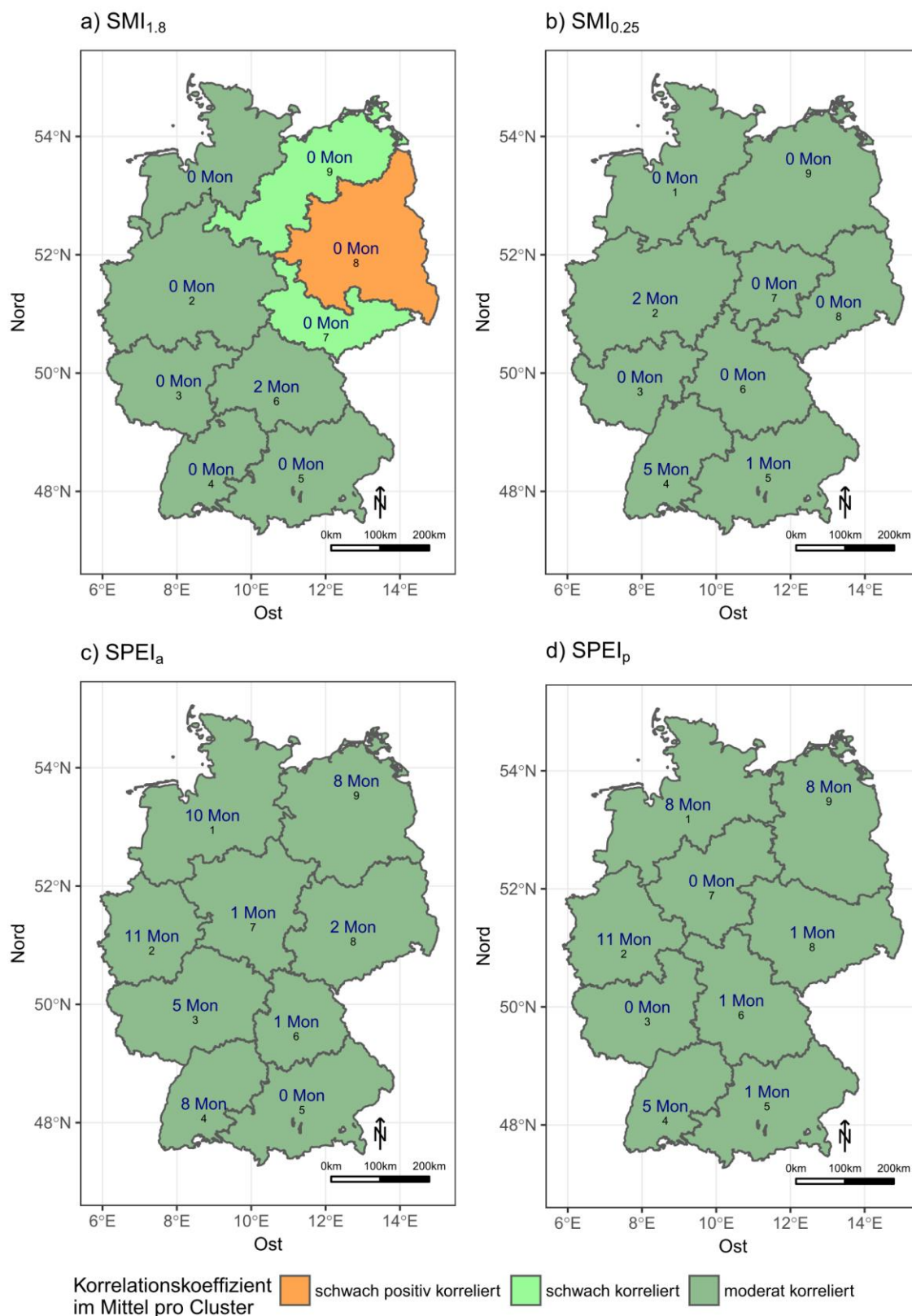


Abbildung 23: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und **der Anzahl ohne Flächengewichtung skalierten auf Abflussmengen bezogener Dürreauswirkungen I_R mit Minimumoption**. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkennlich.

5 Ergebnisse

Flächengewichtung skalierten Auswirkungen I_R auf Clusterebene sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt.

Zu Beginn soll die Korrelationsstärke der Cluster für die verschiedenen Indizes und beide Varianten vergleichend betrachtet werden. Für die beiden Bodenfeuchteindizes $SMI_{1,8}$ und $SMI_{0,25}$ sind die Korrelationsstärken beider Korrelationsvarianten mit und ohne Minimumoption gleich hoch. Für die standardisierten Bodenfeuchteindizes beträgt der Unterschied im deutschlandweiten Mittel der Korrelationsstärke zwischen den Varianten lediglich 0.02. Während sich für den $SMI_{0,25}$ für ganz Deutschland im Mittel moderate Korrelationen pro Cluster ergeben, sind die Gegensätze für den $SMI_{1,8}$ höher. Bei dem $SMI_{1,8}$ zeigt der Südwesten Deutschlands moderate Korrelation im Mittel für die Cluster auf. Der Nordosten hingegen bildet zwei Cluster mit schwacher Korrelation und sogar ein Cluster mit schwach positiver Korrelation ab. Das bedeutet, dass hier entgegen der Annahme bei statistisch gesehen feuchten Böden Dürreauswirkungen bezüglich der Abflussmengen auftreten und gleichzeitig bei statistisch trockenen Böden häufig keine Dürreauswirkungen beobachtet worden sind. Für die standardisierten Niederschlags-Evapotranspirationsindizes ist der Unterschied bei Betrachten der Korrelation mit und ohne Minimumoption stärker (Differenz der mittleren Korrelationsstärke für Deutschland 0.09 - 0.11). So sind für den $SPEI_a$ und $SPEI_p$, bei der Korrelation ohne Minimumoption noch gehäuft (sieben bzw. vier) Cluster mit schwacher Korrelation erkenntlich. Die restlichen Cluster zeigen eine moderate Korrelation im Mittel für die darin liegenden NUTS3 auf. Bei der Korrelationsvariante mit Minimumoption sind für beide Indizes durchgängig moderate Korrelationen erkennbar.

Nun wird der Zeitversatz beider Korrelationsvarianten betrachtet. Für die Bodenfeuchteindizes wird dabei ersichtlich, dass es nur wenige Unterschiede und jeweils nur um wenige Monate Versatz zwischen beiden Varianten gibt. Für die Niederschlags-Evapotranspirationsindizes hingegen ist zum einen eine höhere Anzahl an Clustern mit unterschiedlichen Zeitversätzen als am stärksten negativ korrelierte Varianten ersichtlich. Gleichzeitig ist die Anzahl der Monate, um die sich der Zeitversatz verändert, größer. Besonders die westlichen Gebiete zeigen ohne Minimumoption nur geringe Zeitversätze von keinem bis einem Monat. Bei der Korrelationsvariante mit Minimumoption hingegen sind die besten Ergebnisse für Zeitversätze von beispielsweise fünf, acht oder elf Monaten ermittelt worden. Man kann also sagen, dass für die Auswirkungen I_R ein deutlicher Unterschied für die Ergebnisse mit und ohne Minimumoption für die Niederschlags-Evapotranspirationsindizes erkennbar ist. Bei höherem Zeitversatz in den westlichen Clustern ergibt sich eine stärkere Korrelation. Für die Bodenfeuchteindizes tritt kaum ein Unterschied zwischen beiden Varianten auf.

Zusammenfassend kann man für die Zusammenhänge der vier Indizes zu hydrologischen Dürreauswirkungen I_R sagen, dass sich zum einen deutschlandweit die am stärksten negativsten mittleren Korrelationskoeffizienten und sogar stärkere Zusammenhänge als für die Land- und Viehwirtschaft für einige Cluster ergeben. Gleichzeitig tritt hier das einzige Mal (für den $SMI_{1,8}$) der Fall auf, dass für ein Cluster eine im Mittel moderat positive Korrelation resultiert. Sowohl zwischen den Methoden der Auswirkungsskalierung als auch

der Option mit und ohne Minimumoption ergeben sich hier unterschiedliche Korrelationszusammenhänge in Stärke und der Höhe des Zeitversatzes für die Niederschlags-Evapotranspirationsindizes. Stärkere Korrelationen für die Cluster konnten für die Skalierung der I_R ohne Flächengewichtung erzielt werden. Weiter konnten vermehrt moderate statt schwache Korrelationszusammenhänge bei der Nutzung der Minimumoption beobachtet werden. Im deutschlandweiten Mittel werden bei der Nutzung der Minimumoption jedoch lediglich um ca. 0.6 stärker negative index- und regionalunspezifische Korrelationskoeffizienten berechnet (vgl. Tabelle 3). Dies steht nicht im Verhältnis zur Zunahme der zusätzlichen Unsicherheiten für diese Methodik. Daher soll für die auf Abflussmengen bezogenen Auswirkungen die Schwellenwertanalyse anhand der ohne Flächengewichtung skalierten und ohne Minimumoption erzielten Korrelationsergebnisse auf Clusterebene durchgeführt werden.

5.2.3 Beziehung zwischen Trockenheit und dem Auftreten von Dürre- auswirkungen

Sowohl für die Land- und Viehwirtschaft als auch für die auf Abflussmengen bezogenen Auswirkungen wurde durch Abwägen der verschiedenen Korrelationsvarianten ermittelt, dass die direkte Korrelation ohne minimale Indexbetrachtung über einen längeren Zeitraum genutzt werden soll. Nun wird auch eine Korrelation der Dürreindizes zum Auftreten von Dürreauswirkungen ohne die Beachtung der Anzahl an Dürreauswirkungen geprüft. Die so ermittelten Zeitversätze und Korrelationsstärken beider Varianten sollen verglichen werden. Aus Anhang III Abbildung 32 und Abbildung 33 können die entsprechenden Ergebnisse auf Clusterebene für beide Wirkungsbereiche entnommen werden. Es wird deutlich, dass in vielen Fällen der gleiche Zeitversatz bei beiden Korrelationsvarianten (mit Anzahl an Dürreauswirkungen bzw. mit dem Auftreten von Dürreauswirkungen) ermittelt wurde. Eine der wenigen Ausnahmen ist das Cluster Nummer 4 mit einem höheren Zeitversatz für auf Abflussmengen bezogene Auswirkungen. Die Einteilung der Korrelationsstärken in Klassen deutet bei der Korrelation ohne Betrachtung der Anzahl an Auswirkungen auf geringfügig höhere Korrelationskoeffizienten hin. Gleichzeitig zeigt sich jedoch für den $SMI_{1,8}$ und das Cluster Nummer 8 kein signifikanter Zusammenhang. Im deutschlandweiten Mittel für alle Indizes konnte für die Land- und Viehwirtschaft und für die auf Abflussmengen bezogene Dürreauswirkungen nur vernachlässigbar stärker negative mittlere Korrelationskoeffizient ermittelt werden (siehe Tabelle 3). Die Boxplot und ROC Analysen werden daher mit denen anhand der Anzahl an Auswirkungen ermittelten Zeitversätzen angewandt.

5.3 Schwellenwertanalyse

Die Boxplotanalyse wurde für alle vier Indizes und die verschiedenen Wirkungsbereiche der Land- und Viehwirtschaft sowie auf Abflussmengen bezogene Dürreauswirkungen durchgeführt. In Tabelle 4 sind die deutschlandweiten mittleren Medianwerte als potentielle Schwellenwerte aufgelisteten. Es wird deutlich, dass fast alle Werte bei Betrachtung der skalierten Auswirkungsdaten über dem bisherigen Schwellenwert von 0.2, aber innerhalb

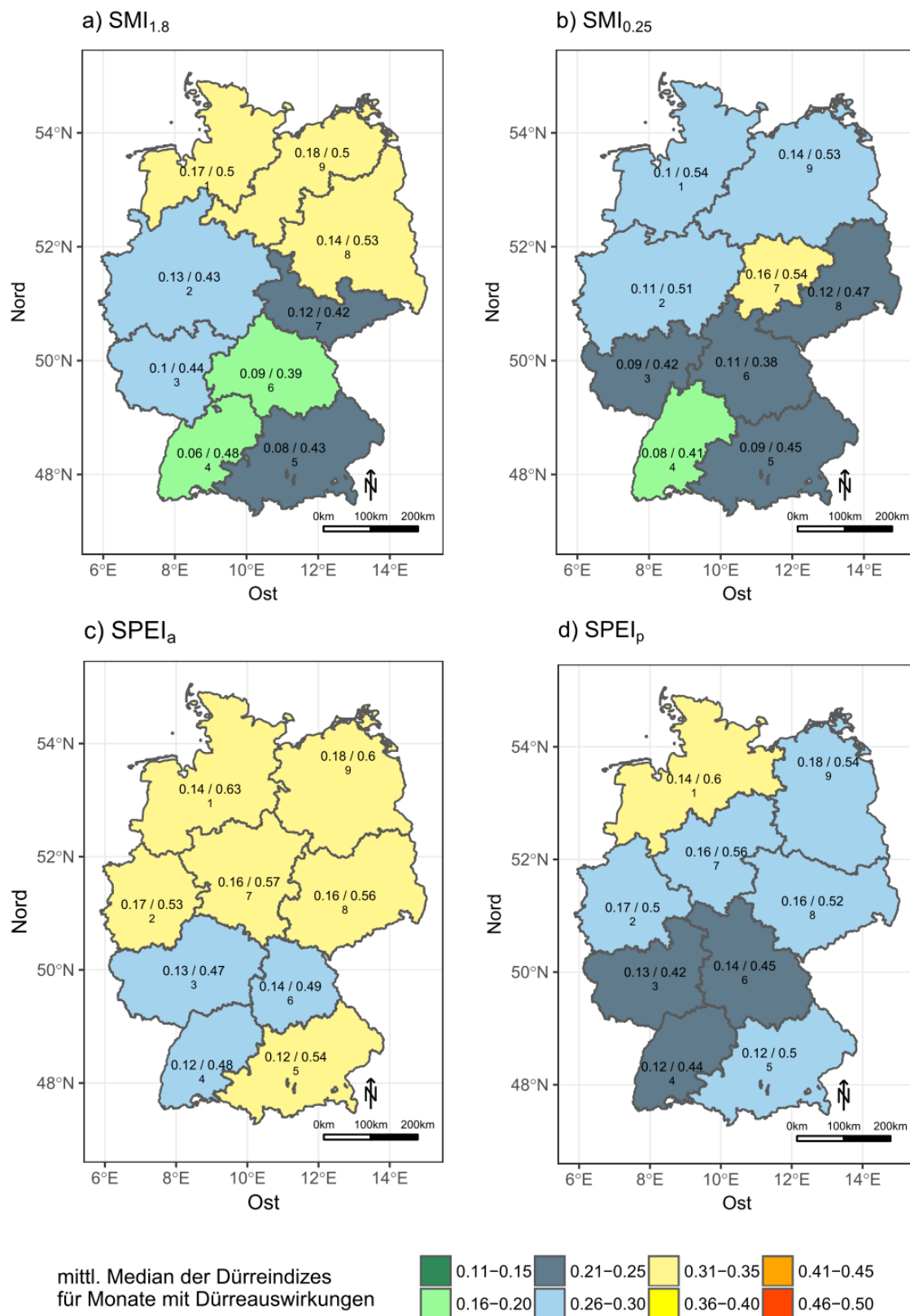
5 Ergebnisse

der bisherigen Vorwarnstufe von 0.3 liegen. Einzige Ausnahme stellt der $SPEI_a$ dar, für den für die Land- und Viehwirtschaft ein Median von über 0.3 vorliegt. Fast ausnahmslos sind die Mediane für den auf Abflussmengen bezogenen Auswirkungsbereich I_R geringer als die Mediane der Land- und Viehwirtschaft I_{LVW} . Betrachtet man weiter die Mediane bei ausschließlicher Nutzung der NUTS3 Originaldaten mit gleicher Zuordnungsmethodik, zeigen sich durchgehend geringere Werte für die Bodenfeuchteindizes und höhere Medianwerte für die Niederschlags-Evapotranspirationsindizes. Im Mittel für alle betrachteten Zusammenhänge liegen die sektorunspezifischen Werte mit 0.25 bzw. 0.24 nahe beieinander.

Tabelle 4: Aus der Boxplotanalyse entstammende Mediane für die einzelnen Indizes ($SMI_{1.8}$, $SMI_{0.25}$, $SPEI_a$, $SPEI_p$), Auswirkungsbereiche (I_{LVW} , I_R) und zugrunde liegende Daten (skalierte Auswirkungsdaten, NUTS3 Originaldaten) bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Daten.

Index	Auswirkungsbereich	Methode: Boxplot Mediane	
		herunterskalierten Daten	NUTS3 Originaldaten
$SMI_{1.8}$	LVW	0.26	0.10
	R	0.21	0.19
$SMI_{0.25}$	LVW	0.24	0.18
	R	0.18	0.17
$SPEI_a$	LVW	0.31	0.39
	R	0.28	0.29
$SPEI_p$	LVW	0.26	0.29
	R	0.23	0.27
Gesamt Mittelwert		0.25	0.24

Nun sollen mögliche räumliche Trends über die Boxplot Charakteristiken pro Cluster überprüft werden. Zur vereinfachten Übersicht werden nur die Medianwerte und Quartile für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang im Mittel für die Cluster, für die jeweiligen Indizes und Auswirkungsbereiche visualisiert. Abbildung 24 stellt die mittleren Medianwerte der einzelnen Cluster für die Vieh- und Landwirtschaft dar. Nur für die Bodenfeuchteindizes gibt es Cluster, in denen der Median unter dem bisherigen Schwellenwert von 0.2 liegt. In den meisten Fällen treten auf Clusterebene Medianwerte zwischen 0.2 und 0.3 auf. Für den $SMI_{0.25}$, den $SPEI_p$ und $SPEI_a$ gibt es jeweils nur ein bzw. drei Cluster, für den der Mittelwert über der bisherigen Vorwarnstufe von 0.3 liegt. Bei dem $SPEI_a$ ist die Mehrheit der Cluster mit mittleren Medianen von über 0.3 vertreten. Ein Nord-Süd-Trend mit in den Südwesten hin abfallenden Medianwerten ist für alle vier Dürreindizes zu erkennen. Aus Anhang III Abbildung 34 wird deutlich, dass das Konfidenzintervall anhand der „Leave-One-Out“ Methodik sehr gering ist und die ermittelten Mediane nicht von einzelnen Ereignissen dominiert werden. Auch das Bootstrapping zeigt enge Konfidenzintervalle. Die größten Intervalle liegen hier für Cluster Nummer 1 und 9 also die nördlichen Regionen vor.



5 Ergebnisse

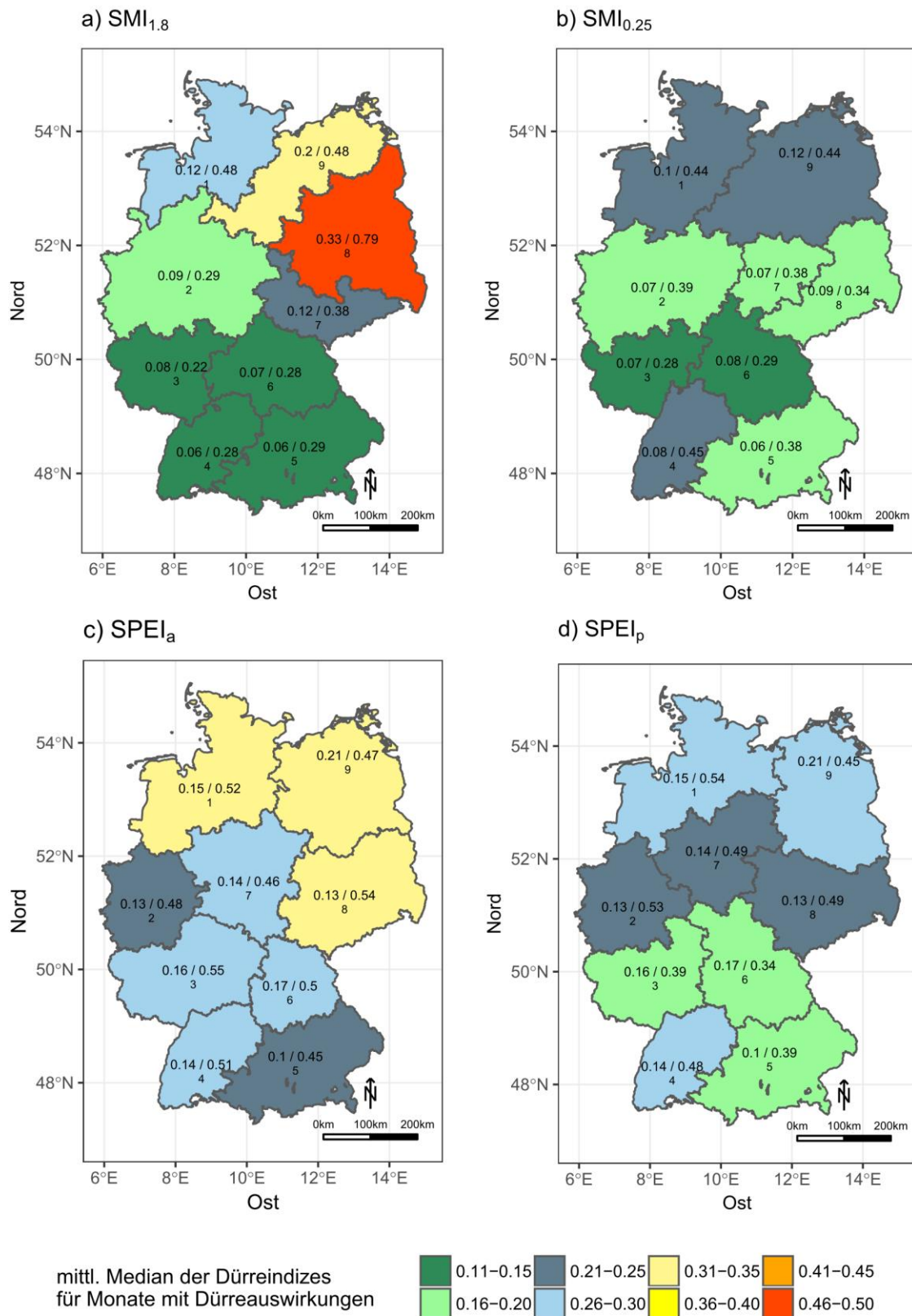


Abbildung 25: Mittlere Mediane der Boxplotanalyse der NUTS3 (mit signifikantem Korrelationszusammenhang) pro Cluster bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Auswirkungen der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R . Beschriftung entspricht jeweils dem ersten und zweiten Quartil bzw. der Cluster Nummerierung.

Auch für den Bereich der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen wurden die Kennwerte der Boxplotanalyse auf Clusterebene gemittelt. Die Ergebnisse werden in Abbildung 25 dargestellt. Hier sind im Mittel deutlich geringere Werte für die Mediane erkennbar. Sowohl bei dem $SMI_{1,8}$ als auch bei dem $SMI_{0,25}$ zeigen die südlichen Cluster fast durchgehend Medianwerte unter 0.2 und weisen Medianwerte bis 0.13 auf. Im Gegensatz dazu sind bei dem $SMI_{1,8}$ im Nordosten hohe mittlere Medianwerte von 0.48 zu erkennen. Dies betrifft insbesondere das Cluster Nummer 8, das in der Korrelationsanalyse einen schwach positiven Korrelationszusammenhang aufweist. Betrachtet man die Konfidenzintervalle der Mediane für den $SMI_{1,8}$ und Cluster Nummer 8 und 9 sind größere Konfidenzintervalle im Vergleich zu anderen Cluster zu erkennen (siehe Anhang III Abbildung 35). Für den $SPEI_a$ und $SPEI_p$ kann man größtenteils mittlere Medianwerte zwischen 0.16 und 0.3 beobachten. Lediglich für den $SPEI_a$ zeigen sich im Nordosten Cluster mit Medianwerten über 0.3. Bei Betrachtung der Abbildung 35 in Anhang III wird deutlich, dass die für den $SPEI_a$ ermittelten Mediane große Konfidenzintervalle für das Bootstrapping aufweisen, die teilweise sogar über die Quartile hinausreichen. Für Cluster Nummer 3 ist auch das Leave-One-Out Konfidenzintervall deutlich erhöht. Insgesamt ist fast durchgehend ein Nord-Süd-Gradient der Medianwerte mit abfallenden Werten zum Südosten zu beobachten.

Fasst man die Ergebnisse der Schwellenwertanalyse mit Hilfe der Boxplots zusammen, lässt sich die Aussage treffen, dass die mittleren Medianwerte für den $SPEI_a$ tendenziell höher sind als jeweils die mittleren Mediane der Dürreindizes $SMI_{1,8}$, $SMI_{0,25}$ und $SPEI_p$. Weiter zeigt der Sektor der Land- und Viehwirtschaft höhere Medianwerte als auf Abflussmengen bezogene Dürreauswirkungen. Es wird deutlich, dass für alle Indizes und beide Auswirkungsbereiche ein fast einheitlicher räumlicher Trend abfallender Medianwerte in Richtung Süden Deutschlands vorliegt. Sektor- und dürreindexunspezifisch konnte ein Median und somit potentieller Schwellenwert von 0.25 bzw. 0.24 ermittelt werden.

5.4 Leistungsfähigkeit der Dürreindizes

Als Alternative zur Boxplotanalyse werden nun die Ergebnisse des probabilistischen Ansatzes der ROC-Kurven dargelegt. Dabei wurde der Schwellenwert ermittelt, für den eine gleichzeitige Minimierung der Fehler erster und zweiter Art bzw. die Maximierung von Sensitivität und Spezifität erreicht wird, um das Auftreten von Dürreauswirkungen anhand der Dürreindizes zu beschreiben. In der Abbildung 26 und Abbildung 27 können die entsprechenden Sensitivitäten, Spezifitäten und AUC-Werte im deutschlandweiten Mittel für die herunterskalierten Dürreauswirkungsdaten je Dürreindex betrachtet werden. Insgesamt gibt es keinen Dürreindex, der zur Abschätzung des Auftretens von Dürreauswirkungen außerordentlich gut geeignet ist. Durchgehend werden AUC-Werte um ca. 65-76 % erreicht. Dabei weisen die Bodenfeuchteindizes höhere AUC-Werte als die Niederschlags-Evapotranspirationsindizes auf und scheinen somit besser als Prädiktoren für das Auftreten von Dürreauswirkungen geeignet zu sein. Betrachtet man weiter die Grenzwertoptimierungskurven, die bei alleiniger Beachtung der NUTS3 Originaldaten entstehen (siehe Anhang III Abbildung 36 und Abbildung 37), so ist auffällig, dass die

5 Ergebnisse

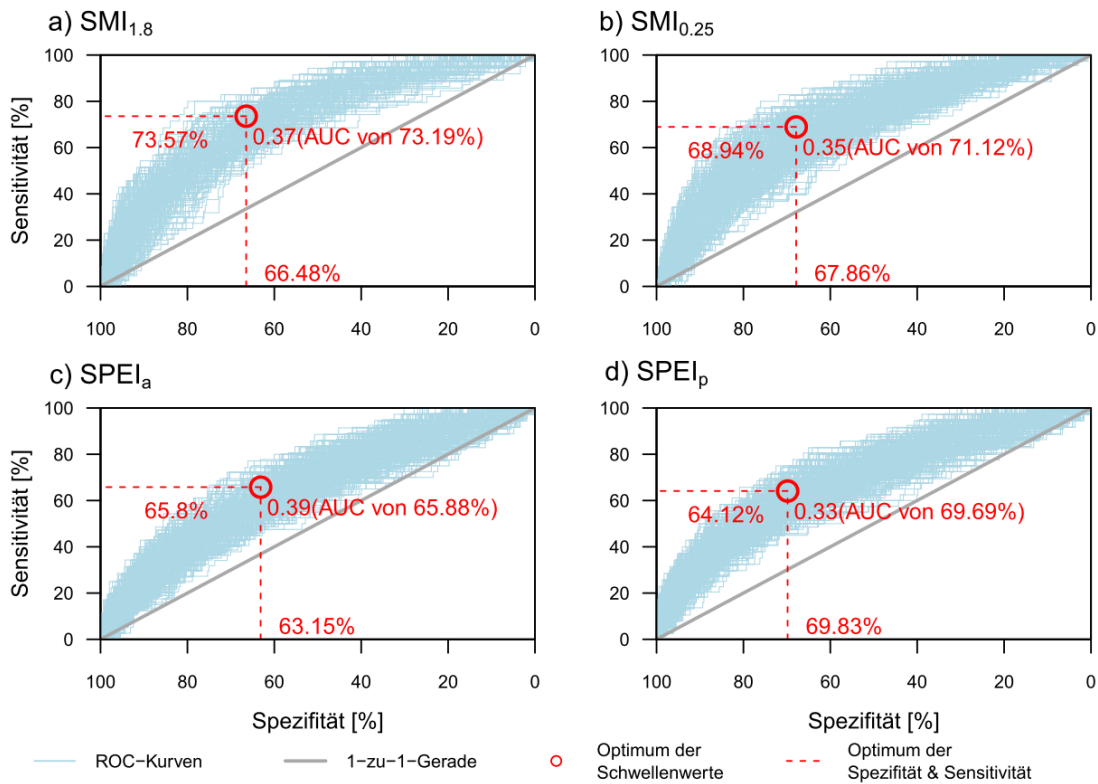


Abbildung 26: ROC-Kurven für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang bei Nutzung der ohne Flächengewichtung herunterskalierten I_{LVW} . Mittlerer idealer Schwellenwert, mittlere AUC-Werte sowie mittlere Sensitivität und Spezifität für alle NUTS3 (mit signifikantem Korrelationszusammenhang) in rot markiert.

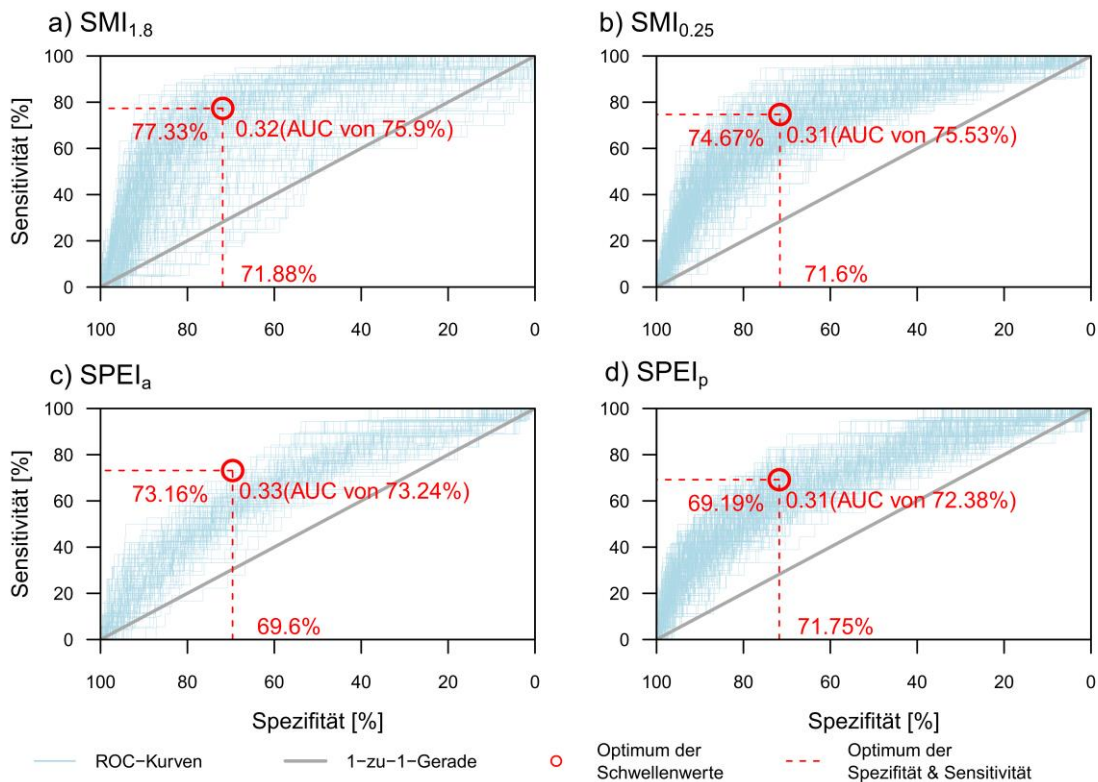


Abbildung 27: ROC-Kurven für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang bei Nutzung der ohne Flächengewichtung herunterskalierten I_R . Mittlerer idealer Schwellenwert, mittlere AUC-Werte sowie mittlere Sensitivität und Spezifität für alle NUTS3 (mit signifikantem Korrelationszusammenhang) in rot markiert.

entsprechenden Spezifitäten und insbesondere Sensitivitäten höher als bei den herunterskalierten Auswirkungsdaten sind. Die AUC-Werte der Bodenfeuchteindizes erreichen über 80 %. Sie sind bei Betrachtung der land- und viehwirtschaftlichen Auswirkungen I_{LVW} im Vergleich zu den AUC-Werten der Niederschlags-Evapotranspirationsindizes deutlich höher. Insgesamt wird ersichtlich, dass Grenzwertoptimierungskurven für die NUTS3 Originaldaten einen kantigen Verlauf haben, anhand deren sich ein index- und sektorunspezifischer Schwellenwert im gleichen Bereich ergibt, wie mit der empirischen Methode der Boxplotanalyse ermittelt.

In Tabelle 5 werden die anhand der ROC-Kurven ermittelten Schwellenwerte für Deutschland und den einzelnen Indizes sowie der Auswirkungsbereiche aufgelistet. Zum einen wird deutlich, dass die auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen mit einer Ausnahme etwas geringere Werte im Vergleich zur Land- und Viehwirtschaft zeigen. Bei Betrachtung der herunterskalierten Dürreauswirkungsdaten ergeben sich anhand der ROC Schwellenwertoptima im Bereich zwischen 0.3 und 0.4 und weisen somit deutlich höhere Werte als die Medianwerte der Boxplotanalysen, sowie dem bisherigen Schwellenwert auf. Bei ausschließlicher Betrachtung der NUTS3 Originaldaten konnte jedoch, wie bereits angedeutet, ein mit den Ergebnissen der Boxplotanalyse übereinstimmendes Ergebnis bei 0.25 ermittelt werden.

Tabelle 5: Aus der ROC-Kurven entstammende mögliche neue Schwellenwerte bei Zuordnung der Dürreauswirkungen zu Dürreindizes über die clusterspezifischen Zeitversätze aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption für herunterskalierte Auswirkungsdaten.

Index	Auswirkungsbereich	Methode: ROC-Kurven	
		herunterskalierten Daten	NUTS3 Originaldaten
SMI_{1.8}	LVW	0.37	0.15
	R	0.32	0.21
SMI_{0.25}	LVW	0.35	0.29
	R	0.31	0.20
SPEI_p	LVW	0.39	0.38
	R	0.33	0.28
SPEI_p	LVW	0.33	0.32
	R	0.31	0.15
Gesamt Mittelwert		0.34	0.25

Man kann für die Ergebnisse der ROC-Analyse zusammenfassend festhalten, dass laut AUC-Werten die Bodenfeuchteindizes als Zeiger für das Auftreten von Dürreauswirkungen im Bereich der Land- und Viehwirtschaft sowie für auf Abflussmengen bezogene Dürreauswirkungen besser geeignet sind als die Niederschlags-Evapotranspirationsindizes. Insgesamt weisen alle betrachteten Dürreindizes für den hier untersuchten Zusammenhang AUC-Werte von ca. 65 bis 75 % auf. Die als optimal ermittelten Schwellenwerte liegen sowohl für die herunterskalierten Dürreauswirkungsdaten als auch die NUTS3 Originaldaten über dem bisher genutzten Schwellenwert von 0.2. Es zeigt sich außerdem wiederholt, dass für Land- und Viehwirtschaft im Vergleich zu auf Abflussmengen bezogenen Auswirkungen bereits bei höheren Indexwerten Auswirkungen auftreten.

5.5 Evaluierung der Ergebnisse

Um das Potential des bisherigen Schwellenwertes mit den in dieser Arbeit ermittelten möglichen neuen Schwellenwerten zu vergleichen, werden die Fehler 1. und 2. Art bei deren Anwendung auf alle NUTS3 Deutschlands (auch Landkreise ohne signifikanten Zusammenhang in der Korrelationsanalyse) berechnet. Insgesamt bewirkt das Hochsetzen des Schwellenwertes, ab dem Dürre anhand der Indizes definiert wird, die Zunahme des Fehlers 1. Art bei gleichzeitiger Abnahme des Fehlers 2. Art für die Beurteilung des Auftretens von Dürreauswirkungen unter Verwendung der EDII Daten.

Aus Tabelle 6 wird deutlich, dass für den bisher genutzten Schwellenwert der Fehler 1. Art 16 – 17 % beträgt. In diesen Fällen liegt der jeweilige Dürreindex unter 0.2, ohne dass Wirkungsberichte in der EDII vorliegen. Der Fehler 2. Art ist jedoch wesentlich höher und liegt sogar teilweise bei über 60 %. In diesen Fällen liegen also Dürreindizes über 0.2 in Monaten vor, in denen mindestens von einer Auswirkung in der EDII für den betrachteten Wirkungsbereich berichtet wird. Bei Anwendung der sektor- und indexspezifischen Medianwerte für ganz Deutschland entsprechend der in Kapitel „5.3 Schwellenwertanalyse“ steigen die Fehler 1. Art auf 15 – 30 % an bei fast durchgehendem Absinken der Fehler 2. Art unter 50 %. Bei Verwendung der in Kapitel „5.4 Leistungsfähigkeit der Dürreindizes“ als optimal ermittelten Schwellenwerte steigt der Fehler 1. Art meist auf teils über 30 % an, während der Fehler 2. Art auch 35 – 45 % reduziert werden kann. Je nach Priorisierung, welche Fehlerarten als schwerwiegender angesehen werden, kann die Höhe der Schwellenwerte abgewogen werden.

Tabelle 6: Für die verschiedenen Dürreindizes des Deutschen Dürremonitors ermittelten Fehler 1. und 2. Art für die sektorspezifische Anwendung der verschiedenen deutschlandweiten Schwellenwerte auf alle NUTS3 Deutschlands zur Beurteilung des Auftretens der herunterskalierten Dürreauswirkungen der EDII.

Ohne Flächengewichtung skalierte Dürreauswirkungen		Bisher (ohne Zeitversatz, SW von 0.2)		Boxplot Mediane (mit Zeitversatz siehe Korrelationsanalyse, SW siehe indexspezifische deutschlandweite Mediane der Boxplotanalyse)		ROC Optima (mit Zeitversatz siehe Korrelationsanalyse, SW siehe indexspezifische deutschlandweite ROC-Optima)	
Index	Fehler \ Auswirkungs- bereich	1. Art [%]	2. Art [%]	1. Art [%]	2. Art [%]	1. Art [%]	2. Art [%]
SMI _{1.8}	LVW	23.3	54.6	16.9	61.8	34.6	40.7
	R	18.1	49.6	16.8	49.5	29.4	35.1
SMI _{0.25}	LVW	21.6	49.9	17.3	55.7	32.8	36.8
	R	15.7	48.8	17.5	45.3	29.0	32.1
SPEI _p	LVW	29.0	49.3	16.4	64.5	37.9	40.3
	R	26.1	54.1	16.8	64.1	31.7	47.5
SPEI _p	LVW	22.8	49.6	15.9	57.3	30.6	41.1
	R	19.9	49.4	16.3	53.3	28.7	38.3

6 Diskussion

Bevor die Ergebnisse dieser Arbeit ausdiskutiert werden, soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass es für die Daten der EDII und des Deutschen Monitors jeweils Unsicherheitsquellen und Einflussfaktoren gibt, die den untersuchten Zusammenhang abmildern und Ergebnisse der Schwellenwertanalyse beeinflussen können. Diese werden für beide Informationsquellen im Folgenden ausführlich betrachtet, bevor die Ergebnisse entsprechend der Abfolge der Arbeitsschritte aus Abbildung 13 diskutiert und in Zusammenhang zu Forschungsergebnissen anderer Literatur gesetzt werden.

Die Anzahl an Dürrauswirkungen in der EDII sowie deren zeitliche und räumliche Zuordnung sind nicht nur von den Dürreeigenschaften sondern von weiteren Faktoren abhängig. Prinzipiell sind, wie bereits erwähnt, selten genaue Zeitangaben sowohl für Beginn als auch Ende der Dürreauswirkungen in der Datenbank vorhanden. Daher liegt die Vermutung nahe, dass es in weiteren Monaten Dürreauswirkungen gibt, die durch die Wirkungsberichte der EDII nicht eindeutig identifizierbar sind. Bei detaillierter Betrachtung der Quelltexte für die Einträge fällt speziell für die Landwirtschaft auf, dass die meisten Auswirkungen der im Frühjahr oder Sommer durch Dürre entstandenen Schäden bezüglich der Qualität und Quantität der Erträge rückwirkend erst in der Erntesaison bilanziert und berichtet werden. Dabei ist die genaue zeitliche Einordnung, in welchem Zeitraum die Schäden entstanden sind, oftmals schwierig.

Darüber hinaus steigt die Anzahl der Datenbankeinträge in der EDII mit der Zeit an und die Jahre vor 1970 sind nur spärlich mit Dateneinträgen abgedeckt (Stahl et al., 2016). Dies kann neben einer möglichen tatsächlichen Zunahme von Dürreereignissen bzw. Dürreauswirkungen mit den Jahren auch von der verstärkten Zugänglichkeit und Verbreitung von Berichten im Zeitalter der digitalen Medien bedingt sein. Nicht nur die Verfügbarkeit sondern ebenso das generelle Medieninteresse hat einen großen Einfluss auf die Anzahl an Einträgen (Collins et al., 2016). Dürreauswirkungen werden heutzutage im Zuge der weltweiten Klimapolitik (IPCC, 2012) vermutlich verstärkt wahrgenommen und häufiger berichtet. Weiter ist die Wahrnehmung von Naturkatastrophen neben Persönlichkeitsfaktoren (z.B. Tendenz zur Risikoübernahme, Kontrollbedürfnis, etc.) auch von rationalen und subjektiven Erwartungen abhängig (Plapp, 2004). Daher ist es wahrscheinlich, dass die Sensibilität der Berichterstatter für Dürreeffekte im Sommerhalbjahr tendenziell höher als im Winterhalbjahr ist und die Anzahl an Dürreauswirkungen innerhalb des Jahresverlaufes möglicherweise verzerrt durch mediale Wirkungsberichte abgebildet wird.

Zusätzlich ist in Kapitel „3.3 Datengrundlage der EDII“ gut zu erkennen, dass das Jahr 2015 insgesamt für Deutschland das Jahr mit den meisten Dürreauswirkungen in der EDII (sowohl für auf Abflussmengen bezogene Auswirkungen als auch für den land- und viehwirtschaftlichen Sektor) ist. Betrachtet man die Rangordnung von Dürreereignissen anhand des SMI in Anhang IV Abbildung 38 nach Zink et al. (2016), zeigt sich, dass das Dürreereignis in diesem Jahr (2015) zwar zu den schwerwiegendsten zehn Ereignissen in Deutschland seit den 1960er Jahren gehört, es aber in Bezug auf Länge, betroffene Fläche

6 Diskussion

und Intensität der Ereignisse laut SMI nicht als das kritischste Ereignis anzusehen ist (Samaniego et al., 2013; Zink et al., 2016). Die hohe Anzahl an Einträgen ist im Vergleich zu anderen Jahren bei Betrachtung der Rangordnung von Ereignissen laut SMI unverhältnismäßig hoch und kann auch auf eine verstärkte Recherche für rezente Dürreereignisse deuten. Bei der Recherche von Wirkungsberichten aus dem Jahr 2015 (der Autorin im Zuge einer hilfswissenschaftlichen Tätigkeit im Voraus dieser Arbeit) wurde zusätzlich ein Fokus auf die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern gelegt, für die im genannten Jahr 2015 die meisten EDII Einträge vorhanden sind. So ist nicht nur die Anzahl von Auswirkungen über die Zeit, sondern darüber hinaus über den Raum durch die Recherchearbeit für die EDII beeinflusst. Prinzipiell kann man bei wachsender EDII Datenbank von einer Reduzierung solcher Verzerrungen ausgehen. Eine Wiederholung der Korrelationsanalyse mit erweiterter EDII Datenbank ist daher zu empfehlen.

Weiter wird in der EDII keine Gewichtung der Einträge je nach Intensität und Schwere der Auswirkungen oder dem Anteil der betroffenen Fläche innerhalb einer NUTS Region vorgenommen. So wird nicht unterschieden, ob ein Bericht beispielsweise von nur einer betroffenen Feldfrucht oder von mehreren Feldfrüchten berichtet, oder um wie viel Prozent beispielsweise der Ertrag zurückgegangen ist. Es wird beispielsweise auch nicht unterschieden, ob die Schifffahrt auf mehreren Flüssen oder nur einem Fahrgerinne betroffen ist. Hier wäre es empfehlenswert, die Einträge der EDII zu überarbeiten und nach betroffener Feldfrucht, Artenspezies und Ähnlichem einheitlich zu differenzieren. In dem Fall könnte für die weitere Forschung interessant sein, wie der Zusammenhang von Dürreindizes zu Dürreauswirkungen unter Beachtung der pflanzenspezifischen phänologischen Phasen ist, also unter Beachtung der Zeiträume, in denen die Wasserverfügbarkeit für das Pflanzenwachstum essentiell ist. Im Zuge dessen wären eine Betrachtungen mit geringerer zeitlicher Auflösung wie beispielsweise eine (zwei) wöchentliche Betrachtung sowohl der Dürreauswirkungen als auch der Dürreindikatoren zu empfehlen (vgl. Sun et al., 2012).

Trotz der hier aufgeführten Faktoren und Modellunsicherheiten gibt es keine alternative Datenbank zu der EDII, die systematisch direkte wie indirekte Auswirkungen nicht nur quantitativer sondern auch qualitativer Art festhält und eine ähnlich lange Zeitreihe und räumliche Abdeckung erreicht (vgl. Bachmair et al., 2016a; Stahl et al., 2016). Wie später ausführlicher dargelegt wird, zeigen die verschiedenen Skalierungsmethoden der Dürreauswirkungen sowie die Betrachtung der Anzahl an Auswirkungen oder lediglich des Auftretens von Dürreauswirkungen kaum Einfluss auf die Korrelationsergebnisse.

Neben den erläuterten Einflussfaktoren bezüglich der EDII treten zusätzlich für die Berechnung der Dürreindizes Unsicherheitsquellen auf. Eine abschließende Kontrolle der Modellergebnisse durch Experten, wie im US Drought Monitor (Svoboda et al., 2002), findet nicht statt. Mögliche Fehlerquellen liegen beispielsweise bereits bei den Eingangsdaten des mesoskaligen Hydrologischen Modells wie Fehler bei der Niederschlagsmessung. Zu den systematischen Messfehlern des Niederschlags zählen je nach Messmethode unter anderem Windeinfluss, Spritzfehler, Benetzungsfehler und Evaporation (Sevruk et al., 2009). Insgesamt könne der Fehler der Niederschlagsmessungen

bei flüssigem Niederschlag 5 – 15 %, für feste Niederschläge sogar 20 – 50 % erreichen (bei Pulverschnee mit Windeinfluss sogar bis 400 %) (Hartmann, 2010). Weiter beruhen die Klimadaten des DWD auf punktuellen Messdaten des Messnetzes zu diskreten Zeitpunkten, die auf ein regelmäßiges Gitternetz interpoliert werden (Samaniego et al., 2013). Besonders konvektive Ereignisse, die in Deutschland typischerweise im Sommerhalbjahr auftreten, sind je nach Messnetzdicke schwer zu erfassen (Grundmann, 2010).

Eine weitere Unsicherheitsquelle bei der Ermittlung von Dürreindizes liegt in der Regionalisierung der klimatischen Eingangsdaten. Die Interpolation wird anhand eines geostatistischen Verfahrens des „External Drift Kriging“ durchgeführt. Dabei wird laut Grundmann (2010) zwar der Gebietsniederschlag gut erfasst, die volle raum-zeitliche Variabilität des Niederschlags jedoch unterschätzt. Die stärksten Unsicherheiten treten dabei für bergige Regionen wie dem Harz, den Alpen und der Schwäbischen Alb auf (Samaniego et al., 2013). Samaniego et al. (2013) konnte jedoch beweisen, dass verschiedene Interpolationsmethoden im Großteil Deutschlands kaum unterschiedliche Modellergebnisse generieren.

Eine andere von Samaniego et al. (2013) als größte herausgestellte Unsicherheitsquelle ist die Bestimmung der Modellparameter des mHMs. Je nach Parametrisierung von Dürreindizes werden gewählte Schwellenwerte verschieden häufig unterschritten (Samaniego et al., 2013; Tjeldeman et al., in Bearbeitung). Keine Parameterverteilung passt perfekt für die zugrunde liegenden Daten und je nach Standardisierung können verschiedene Schlussfolgerungen aus den berechneten Dürreindizes gezogen werden (Samaniego et al., 2013; Tjeldeman et al., in Bearbeitung). Um Annahmen von Parameterverteilungen zu vermeiden, wählten Samaniego et al. (2013) daher die nicht-parametrische Kernel-Dichte Methodik. Hier zeigte ein Modellensemble, dass die Parameterwahl mit gleicher Parametrisierung weiterhin einen Einfluss auf die Klassifikation des Index in Dürreklassen hat (Samaniego et al., 2013). Die Anwendung der Niederschlags-Evapotranspirationsindizes mit der in dieser Arbeit genutzten Standardisierung nach Samaniego et al. (2013) im Vergleich zu den Niederschlags-Evapotranspirationsindizes mit Standardisierung nach Stagge et al. (2015b) für die hier betrachtete räumliche Auflösung und betrachtete Auswirkungsbereiche ist daher ein interessanter Ausblick dieser Arbeit.

In dieser Arbeit wurden weiter Dürreindizes für Flächen der CORINE Landnutzungs-kategorie 2.1.1 berechnet. Ein Vergleich dieser Werte zu Dürreauswirkungen anderer Landnutzungen wurde mit der Annahme durchgeführt, dass die Trockenheitsanomalie der Böden und der klimatischen Wasserbilanzen sich in den kleinräumig aufgelösten NUTS3 Regionen nicht deutlich unterscheiden. Diese Annahme konnte im Zuge dieser Arbeit mangels Dürreindexdaten für andere Landnutzungsflächen nicht überprüft werden.

Zusätzlich ist laut Samaniego et al. (2013) die Unsicherheit der SMI-Werte weder in Zeit noch im Raum konstant, da Wechselbeziehungen der Bodenfeuchte zu klimatischen Variablen (z.B. Niederschlag und Verdunstung) bestehen. Dürreereignisse im Winter zeigen dabei geringere Modellunsicherheiten als Dürreereignisse im Sommerhalbjahr und humide Regionen weisen geringere Modellunsicherheiten als klimatisch trockenere Regionen auf (Samaniego et al., 2013).

6 Diskussion

Trotz der erläuterten Unsicherheiten konnte das im Deutschen Dürremonitor genutzte mesoskalige Hydrologische Modell zur Berechnung von Dürreindizes bereits in über 100 Einzugsgebieten in Deutschland und auch weltweit erfolgreich angewendet werden. Für die Datenqualität der hier untersuchten Dürreindizes spricht, dass dabei stets zufriedenstellende Ergebnisse erzielt wurden (Samaniego et al., 2010; Samaniego, 2017).

Diese genannten Faktoren und Unsicherheiten der Dürreauswirkungsdaten der EDII sowie den Dürreindexdaten des Deutschen Dürremonitors sollten dem Leser bewusst sein, beeinflussen die in dieser Arbeit betrachteten Zusammenhänge zwischen beiden Informationsquellen jedoch nur geringfügig. Dies wird aus der Betrachtung verschiedener Skalier- und Korrelationsvarianten deutlich. Doch nun soll vorerst auf die Ergebnisse der Autokorrelationsanalyse der Dürreindizes, als ersten Schritt der durchgeführten Analyse eingegangen werden.

Anhand der zeitlichen Autokorrelationsanalyse der Dürreindizes konnte demonstriert werden, dass die Dürreindizes, da standardisiert, kein saisonales Muster aufweisen. Gleichzeitig ist hier deutlich geworden, dass die Bodenfeuchteindizes im Vergleich zu den meteorologischen Dürreindizes stärkere Abhängigkeiten zu den Werten der vorhergehenden Monate zeigen. Dabei nimmt das Gedächtnis der Böden mit zunehmender Tiefe und entsprechend zunehmender Wasserhaltekapazität zu (Wu et al., 2009). So ist der monatliche $SMI_{1,8}$ von der Wasserverfügbarkeit im Boden von vor über einem Jahr abhängig, der monatliche $SMI_{0,25}$ ist in seiner Ausprägung ungefähr vom vorhergehenden Quartal abhängig. Die Wasserspeicherkapazität ist je nach Bodentyp verschieden (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2017). Bodenfeuchteindizes sind daher zeitlich weniger reaktiv als die Niederschlags-Evapotranspirationsindizes.

Da es starke räumliche Autokorrelationen zwischen den Zeitreihen der NUTS3 für die Dürreindizes gibt, wurde einer Clusteranalyse durchgeführt. Aus dieser Analyse kann man entnehmen, dass für alle vier betrachteten Indizes, dem $SMI_{0,18}$, dem $SMI_{0,25}$, dem $SPEI_a$ und dem $SPEI_p$, räumlich zusammenliegende NUTS3 einen ähnlichen Verlauf mit der Zeit zeigen. Räumlich kohärente Cluster können gebildet werden, ohne weitere geographische Informationen anzugeben. Dies bestätigt den ausgeprägten regionalen Charakter der betrachteten Dürreindizes (vgl. Stahl, 2001). Gleichzeitig muss beachtet werden, dass die Clusterbildung von der betrachteten Zeitreihe sowie der Clustermethodik abhängt. Weiter soll darauf hingewiesen werden, dass Cluster aus einer unterschiedlichen Anzahl an NUTS3 Regionen bestehen und die Anteile der land- und viehwirtschaftlich genutzten Flächen, sowie der Anteil abflussrelevanter Flächen variieren. Prinzipiell wäre auch eine überregionale Gruppierung der NUTS3 Landkreise anhand der 16 Bundesländer (NUTS1 Regionen) möglich gewesen. Davon kann jedoch abgeraten werden, da diese lediglich administrative Einheiten sind und in keiner Weise naturräumliche Charakteristika repräsentieren.

Folgend wurde eine Skalierung der Dürreauswirkungsdaten durchgeführt. Die Land- und Viehwirtschaft ist in Deutschland der am stärksten in der EDII vertretene Sektor (Stahl et al., 2016). Trotzdem konnte in der Darstellung der Datengrundlage demonstriert werden, dass es in diesem Sektor und ebenso für auf Abflussmengen bezogene Dürreauswirkungen

nicht genügend Einträge in der EDII auf NUTS3 Ebene gibt, um räumlich hochaufgelöste Analysen durchzuführen. Der Bedarf von mehr Einträgen zu Dürreauswirkungen auf NUTS3 Ebene wurden bereits durch Bachmair et al. (2015), Blauhut et al. (2015), Stagge et al. (2015a) und Stahl et al. (2016) geäußert. Aktuell ist die verlässlichste Datengrundlage der EDII auf Länderebene oder Länder-übergreifender Skala (Stahl et al., 2016). Da eine Erweiterung der EDII Einträge im Zuge dieser Arbeit kurzfristig nicht möglich war, wurden die Daten verschiedener räumlicher Ebenen (Deutschlandweit, NUTS1, NUTS2) auf die NUTS3 Ebene herunterskaliert, um eine räumlich hochaufgelöste Analyse zu ermöglichen. In der Korrelationsanalyse konnte festgestellt werden, dass die Wahl der Skalierungsmethode für die Beurteilung der Korrelationssignifikanzen und Korrelationskoeffizienten nicht ausschlaggebend ist. Ergebnisse beider Skalierungsvarianten unterscheiden sich für den Korrelationskoeffizienten im Mittel für ganz Deutschland lediglich geringfügig. Nur der relative Verlauf der Auswirkungsanzahl über die Zeit und nicht die absolute Anzahl an Auswirkungen ist bei der rangbasierten Untersuchung des Zusammenhanges von Indizes zu Auswirkungen von Bedeutung. Die relativen Verhältnisse unterscheiden sich zwischen den Skalierungsmethoden kaum. Bisherige Auswertungen der EDII Einträge sind in vorhergehenden Studien jeweils ohne jegliche Gewichtung der Einträge der verschiedenen Ebenen getätigt worden (Bachmair et al., 2015; Bachmair et al., 2016b; Blauhut et al., 2015; Blauhut et al., 2016; Stahl et al., 2016). Aus Konsistenzgründen kann daher empfohlen werden, das Herunterskalieren der Daten mit gleicher Methodik, also ohne Flächengewichtung, durchzuführen. Für die Zukunft ist es interessant, sowohl die Korrelations- als auch die Schwellenwertanalyse nochmals mit erweiterter Datengrundlage in der EDII zu wiederholen. Idealerweise sollten dann, wenn möglich, ausschließlich NUTS3 Originaleinträge ohne das Herunterskalieren von Auswirkungen anderer NUTS Ebenen genutzt und mit den hier erhaltenen Ergebnissen verglichen werden. Die Betrachtung der EDII Textbeschreibungen lässt erkennen, dass je kleiner die beschriebene Region der EDII Einträge, umso detaillierter sind die Angaben zu Zeit, Ort und Art der Dürreauswirkung. Daher ist die sachgemäße Wahrnehmung und Berichterstattung wahrscheinlicher und umso besser kann das Auswirkungsereignis vermutlich in Relation zu ablaufenden natürlichen Prozessen gebracht werden.

Ein alternativer Ansatz neben der weiteren Recherche, eine größere Datengrundlage für die NUTS3 Ebene zu erhalten, ist die Anwendung von sogenannten „Null-Inflations-Modellen“. Hier wird angenommen, dass es neben „wahren Nullen“, also Monate in denen es keine Dürreauswirkung gegeben hat, „falsche Nullen“ gibt (Zuur et al., 2009). Diese beschreiben Fälle, in denen aus der Datenbank kein Eintrag vorliegt, obwohl es Dürreauswirkungen gegeben hat. Gründe dafür könnten unter anderem sein, dass die Dürreauswirkung entweder (1) nicht von Menschen beobachtet, gemessen oder bemerkt wurde, oder (2) schlichtweg keine Quelle davon berichtet hat, obwohl die Auswirkungen bekannt waren, oder (3) dass es einen Wirkungsbericht gibt, dieser aber noch nicht in der EDII eingetragen ist. Die Null-Inflations-Modelle berechnen eine Vorwahrscheinlichkeit darüber, wie wahrscheinlich es ist, dass eine Dürreauswirkung aufgetreten, aber nicht in der Datenbank gespeichert ist. Über eine negative Binomialverteilung können dann

6 Diskussion

hypothetische Dürreauswirkungen generiert werden und diese mit den Dürreindizes verglichen werden (Zuur et al., 2009). Für diese vielversprechende Methode liegen jedoch noch nicht ausreichend Grundinformationen auf NUTS3 Ebene vor, um sie für ganz Deutschland anwenden zu können.

Ferner wurde zusätzlich untersucht, ob die Zuordnung der Anzahl Dürreauswirkungen zu Dürreindizes über das Minimum innerhalb eines mehrmonatigen Zeitraumes von maximal fünf Monaten stärkere Korrelationszusammenhänge zeigt. Die Korrelationsergebnisse weisen kaum unterschiedliche Werte zwischen den beiden Methoden auf. Insgesamt kann man zu der Anwendung der Minimumoption also sagen, dass für die Betrachtung der minimalen Dürreindizes über einen mehrmonatigen Zeitraum das Verhältnis des Informationsgewinns zum Anstieg der Unsicherheit gering ist. Es kann hier daher empfohlen werden, eine direkte Zuordnung von Dürreauswirkungen zu Dürreindizes statt minimaler Indexbetrachtung innerhalb eines Zeitraumes durchzuführen.

Aus den Ausführungen zu den Unsicherheiten der EDII kann man schlussfolgern, dass die Anzahl an Auswirkungen mit mehr Unsicherheit behaftet ist als die bloße Information über das Auftreten von Dürreauswirkungen. Im Vergleich der Korrelation anhand der Anzahl an Auswirkungen mit der binären Information zum Auftreten von Dürreauswirkungen konnte jedoch deutlich gemacht werden, dass die Zusammenhänge zu den Dürreindizes nur geringfügig stärkere Korrelationen zeigen. Dies spricht für die hohe Datenqualität der EDII und die hier angewandte Methodik. Im Vergleich über die Zeit kann die Anzahl an Auswirkungen gut als relatives Maß zur Intensität von Dürre genutzt werden. Insgesamt spielt, wie bereits erwähnt, für die in dieser Arbeit angewendete Korrelationsanalyse sowohl die absolute Anzahl an Auswirkungen als auch die absoluten Werte der Dürreindizes eine untergeordnete Rolle. Betrachtet werden die Ränge innerhalb der Daten, die kaum durch die erläuterten systematischen Fehler beeinflusst werden.

Zusammenfassend konnte in der Korrelationsanalyse veranschaulicht werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Dürreindizes und der Anzahl der aufbereiteten Dürreauswirkungsdaten sowohl für land- und viehwirtschaftliche als auch auf Abflussmengen bezogene Dürreauswirkungen besteht. Für die betrachteten Indizes konnten bis auf eine Ausnahme jeweils schwache bis moderate negative Korrelationen ermittelt werden. Eine ansteigende Anzahl an Dürreauswirkungen in Monaten mit geringen Dürreindexwerten ist zu beobachten. Weiter ist ein Nord-Süd-Gefälle mit weniger signifikanten Zusammenhängen und geringeren Korrelationsstärken für die nördlichen Regionen Deutschlands bei Betrachtung landwirtschaftlicher Dürre erkennbar. Ähnliche Ergebnisse sowohl zur Korrelationsstärke sowie Hinweise auf einen räumlichen Gradienten fanden auch Bachmair et al. (2015) für meteorologische Dürreindizes verschiedener Akkumulationszeiträume in ihren Untersuchungen. Einerseits kann das räumliche Gefälle ein Hinweis auf eine möglicherweise höhere Datenqualität der Einträge für die südlichen Regionen Deutschlands sein. Weiter kann es unter anderem mit der Anzahl der Dürreauswirkungen für entsprechende Regionen erklärt werden, da Korrelationssignifikanzen vom Stichprobenumfang abhängig sind (Hedderich und Sachs, 2016). Andererseits können geringere Unterschiede der Indexwerte für Monate mit und

ohne Dürreauswirkungen ein weiterer Grund für schwächere Korrelationszusammenhänge sein. Für die nördlichen Cluster Deutschlands liegen sowohl eine geringere Anzahl an EDII Einträgen, sowie später in der Schwellenwertanalyse ersichtlich, Auswirkungen bei höheren Dürreindizes vor.

Bei Betrachtung der Korrelationsergebnisse wird des Weiteren ersichtlich, dass die Ergebnisse für Auswirkungen der CORINE Landnutzungs Klasse 2.1.1 I_{CL} den Ergebnissen des gesamten land- und viehwirtschaftlichen Sektors I_{LVW} ähneln. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass diese Landnutzung den größten Anteil der Land- und Viehwirtschaft in Deutschland ausmacht (Europäische Umweltagentur, 2016) und in der EDII die meisten Wirkungsberichte diese Landnutzung betreffen (vgl. Kapitel „3.3 Datengrundlage der EDII“). Für den Zusammenhang dieser Landnutzung zu den Dürreindizes wurde flächendeckend festgestellt, dass es keinen oder nur einen einmonatigen Zeitversatz der Dürresignale gibt. Einzige Ausnahme stellt sowohl für I_{LVW} und I_{CL} der Zusammenhang vom SMI_{1,8} zum Cluster Nummer 1 dar. Bei einem rückwirkenden Einblick in die EDII Datenbank fällt hier auf, dass es nur wenige Wirkungsberichte auf NUTS1 Ebene für diese Region gibt (Sommer 1992, Sommer 2000, Juni 2003 und Sommer 2008). Aufgrund der geringen Anzahl an Dürreauswirkungen haben einzelne Einträge einen grundlegenden Einfluss auf das Ergebnis der Korrelation. Besonders fiel der Wirkungsbericht für den Sommer 2000 ins Auge (Identifikationsnummer bf_41291_1258). Dieser Wirkungsbericht ist der einzige Bericht in Deutschland zu diesem Zeitpunkt. Bei Betrachtung der Zeitreihe des Bodenfeuchteindex für den Gesamtboden fällt auf, dass die Gesamtböden Ende Herbst/ Anfang Winter 1999 stärkere Trockenheitsanomalien anzeigen als im Sommer 2000. Für die Monate Ende 1999 liegen in der EDII keine Wirkungsberichte vor. Dies kann den ermittelten Zeitversatz von neun Monaten als stärkste negative Korrelation erklären. Dieser Wirkungsbericht stammt von einer Versicherung gegen landwirtschaftliche Schäden aufgrund von Hagel, Sturm und Starkregen. Trockenheit bzw. Dürre wird durch genannte Versicherung nicht abgesichert. Daher kann die Glaubwürdigkeit des Berichtes und somit der hier ermittelte mehrmonatige Zeitversatz angezweifelt werden.

Weiter konnte die Annahme bestätigt werden, dass zu den anderen Dürreauswirkungen der Land und Viehwirtschaft (exklusive CL) ein negativer Zusammenhang besteht und dass dieser, wie angenommen, im Mittel geringer negative Korrelationskoeffizienten aufweist. In vielen Fällen konnte die Annahme eines mehrmonatigen Zeitversatzes zwischen den Dürresignalen für Bodenfeuchteindizes und Dürreauswirkungen bestätigt werden. Die Niederschlags-Evaporationsindizes zeigen mehrmonatige Zeitversätze nur für den Nordosten. Im Südwesten wurden die am stärksten negativen Korrelationsergebnisse ohne Zeitversatz ermittelt. Möglicherweise ist für die Beschreibung des hier betrachteten Zusammenhanges die Kombination der Bodenfeuchteindizes mit Zeitversatz und der Wasserbilanzindizes ohne Zeitversatz als Dürrezeiger besser als die separate Betrachtung der Dürreindizes geeignet. Generell ist es interessant, die Leistung mehrerer kombinierter Dürreindizes mit der hier separaten Betrachtung der einzelnen Dürreindizes zu vergleichen (vgl. Sun et al. (2012)).

6 Diskussion

Entgegen der Annahme, dass der stärkste Zusammenhang der Dürreindizes zu Auswirkungen der Landnutzungs Klasse 2.1.1 I_{CL} entsprechend auftreten, konnten die stärksten Korrelationskoeffizienten für auf Abflussmengen bezogene Dürreauswirkungen und die Bodenfeuchteindizes ermittelt werden. Aufgrund des höheren Unterschieds von Indexwerten in Monaten mit Dürreauswirkungen zu Monaten ohne Dürreauswirkungen konnten für die hydrologische Dürre stärkere Zusammenhänge ermittelt werden. Räumlich betrachtet, treten keine klaren Muster für alle vier untersuchten Dürreindizes auf. Für die auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R fällt bei der Betrachtung des mittleren Korrelationszusammenhangs auf Clusterebene nur eine Region mit einer positiven Korrelation auf. Es stellte sich für die meisten Gebiete Deutschlands weiter heraus, dass der Zusammenhang der Bodenfeuchteindizes, die wie in der Autokorrelation ersichtlich, von den Bedingungen mehrerer Monate abhängen, stärkere Zusammenhänge zu hydrologischen Dürreauswirkungen zeigen als die monatlichen Niederschlags-Evapotranspirationsindizes, die nicht in ihrer Ausprägung von den Vormonaten beeinflusst werden. Die hydrologische Dürre entwickelt sich über längere Zeit und ist daher stärker von längerfristig anhaltender Trockenheit als von kurzfristigen Ereignissen abhängig (van Loon, 2015; Wilhite, 2000). Möglicherweise eignen sich hier über mehrere Monate akkumulierte SPEI-Werte besser als monatliche SPEI-Werte als Zeiger von Dürreauswirkungen.

Insgesamt konnte für keinen der betrachteten Zusammenhänge im Vergleich der Bodenfeuchteindizes zu Niederschlags-Evapotranspirationsindizes die Annahme eines grundsätzlich höheren Zeitversatzes für Niederschlags-Evapotranspirationsindizes bestätigt werden. Auch zwischen landwirtschaftlichen Dürreindizes und hydrologischen Dürreauswirkungen konnte kein flächendeckender Zeitversatz festgestellt werden. Einerseits findet die Ausbreitung möglicherweise in zeitlich höherer Auflösung statt und eine monatliche Betrachtung kann die Prozesse nicht erfassen. Andererseits ist es nicht ausgeschlossen, dass die Dürreausbreitungsprozesse zu komplex sind, um diese durch die hier durchgeführte Korrelationsanalyse zu erfassen. Zum einen sind die Dürreausbreitungsprozesse von vielen klimatischen, geologischen, etc. Faktoren abhängig (van Loon, 2015), zum anderen werden diese Prozesse vor allem auf der Einzugsgebietsskala kontrolliert (Tallaksen et al., 2009) und weisen möglicherweise kein Muster auf administrativer NUTS3 Ebene auf. Das Dürremanagement findet in der Regel auf Einzugsgebietsskala statt (Bundeskabinett der Bundesrepublik Deutschland, 2011). Für weitere Analysen wäre es folglich interessant, statt einem Vergleich auf administrativer Ebene durchzuführen, hydrologische Einzugsgebiete als räumliche Auflösung zu betrachten.

Ein besonderer Fokus soll nun auf den Zusammenhang vom SMI_{1,8} zu Dürreauswirkungen für das Cluster Nummer 8, im Nordosten Deutschlands, gelegt werden, da für dieses Cluster die einzig positiven Korrelationszusammenhänge zwischen Dürreauswirkungen und Dürreindizes vorliegen. Generell konnten für den Nordosten Deutschlands die wenigsten signifikanten Zusammenhänge auf NUTS3 Ebene festgestellt werden. Im Mittel konnte für den SMI_{1,8} im Cluster Nummer 8 keine signifikante Korrelation zu dem Auftreten von Dürreauswirkungen der landwirtschaftlichen Dürre ermittelt werden. Sowohl die

Korrelation mit der Anzahl als auch dem Auftreten an auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen weist dort eine schwach positive Korrelation und in umliegenden Clustern schwach negative Korrelation für jegliche Korrelationsvarianten auf. Zum einen liegen, wie bereits angemerkt, für den Nordosten Deutschlands weniger Wirkungsberichte als für den Südwesten vor. Zusätzlich sind, wie in der Boxplotanalyse erkenntlich, die Indexwerte in den Monaten, in denen Auswirkungen auftreten, die höchsten hier ermittelten Werte im Vergleich mit anderen Clustern oder Indizes. Eine erste Vermutung, warum eine positive Korrelation vorliegt, ist ein möglicher Trend in den Datengrundlagen. Die Anzahl an Dürreauswirkungen der EDII unterliegt einem ansteigenden Trend mit der Zeit (Stahl et al., 2016). Ein gleichzeitiger ansteigender Trend des Bodenfeuchteindex für den Gesamtboden würde eine positive Korrelation erklären. Samaniego et al. (2013) konnte tatsächlich Trends für zunehmend feuchtere Winter und trockenere Sommermonate in Deutschland feststellen. Generell nehme der Bodenfeuchteindex für die betrachtete Region jedoch tendenziell ab (Samaniego et al., 2013). Ein Trend der Daten kann als Grund für eine positive Korrelation also ausgeschlossen werden. Ein anderer möglicher Grund ist, dass es Grenzen bei der Vorhersage von Dürre mit Dürre gibt. Für diese Region scheint die Bodenfeuchte des Gesamtbodens schlecht als Zeiger für das Auftreten von hydrologischer und landwirtschaftlicher Dürre geeignet zu sein. Als Fazit konnte in der Korrelationsanalyse ein Zusammenhang der beiden Informationsquellen (EDII und Deutscher Dürremonitor) zum einen für alle betrachteten Dürreindizes und zum anderen für alle betrachteten Auswirkungsbereiche bestätigt werden. Mit den in der Korrelationsanalyse erworbenen Kenntnissen wurden im Weiteren eine Schwellenwertanalyse anhand von Boxplots und die ROC-Analyse durchgeführt.

Bei Betrachtung der Boxplot-Mediane und der ROC-Optima als potentiell neue Schwellenwerte zeigte sich im deutschlandweiten Vergleich, dass Auswirkungen der landwirtschaftlichen Dürre bei statistisch weniger trockenen Bedingungen auftreten als für Auswirkungen der hydrologischen Dürre. Dies entspricht dem allgemein anerkannten Prinzip der Dürreausbreitung bei anhaltender Trockenheit von meteorologischer zu landwirtschaftlicher weiter zur hydrologischen Dürre (van Loon, 2015; Wilhite und Glantz, 1985). Diese Ergebnisse stimmen weiter mit Kenntnissen von Blauhut et al. (2016) überein, die das Dürreerisiko für Land- und Viehwirtschaft in Deutschland, bei bereits weniger extremen Trockenbedingungen, im Vergleich zu anderen Sektoren am höchsten einordnen. Diese Funde sprechen außerdem dafür, dass unterschiedliche Schwellenwerte, je nach betroffenen Sektor bzw. funktionalem Dürretypen genutzt werden sollten.

Im Vergleich zwischen den Indizes wurden die höchsten Schwellenwerte für die Boxplot- und ROC-Analyse bei dem SPEI_a für die herunterskalierten Auswirkungsdaten und die NUTS3 Originaldaten der Land- und Viehwirtschaft erkenntlich. Dies verdeutlicht, dass selbst geringe Anomalien der klimatischen Wasserbilanzen mit aktueller Verdunstung bereits Auswirkungen für Pflanzen und Tiere bedeuten können. Dieser Dürreindex ist offensichtlich im Vergleich der sensibelste Zeiger von Dürreauswirkungen. Ein anderer interessanter Punkt, der weiterer Nachforschung bedarf, ist der Unterschied der Mediane zwischen Anwendung der herunterskalierten und lediglich der NUTS3 Originaldaten.

6 Diskussion

Lokalräumliche Dürreereignisse zeigen im Vergleich mit den überregional herunterskalierten Auswirkungen niedrigere SMI- und gleichzeitig höhere SPEI-Werte. Dies ist ein Hinweis auf einen unterschiedlich hohen Einfluss der verschiedenen physikalischen Prozesse für das Auftreten von Dürre auf lokaler und überregionaler Ebene. Alles in Allem wurden jedoch im sektor- und indexunspezifischen Mittel für NUTS3 Originaldaten in der ROC-Analyse und der Boxplotanalyse, sowie für die herunterskalierten Auswirkungsdaten in der Boxplotanalyse, ähnliche Schwellenwerte ermittelt. Diese liegen allesamt über dem bisherigen Schwellenwert von 0.2. Für die herunterskalierten Daten wurde in der ROC-Analyse ein Schwellenwert von 0.34 ermittelt, der sogar über der bisherigen Vorwarnstufe von 0.3 liegt. Dieser Wert wurde bei gleicher Gewichtung für die Fehler 1. und 2. Art ermittelt und könnte als neue Vorwarnstufe dienen. Die Boxplotanalyse zeigte, dass die meisten Auswirkungen jedoch erst bei 0.25 auftreten. Der gleiche Wert wurde bei der ROC Analyse für die NUTS3 Originaldaten ermittelt. Daher kann für den Deutschen Dürremonitor die Empfehlung ausgesprochen werden, den Schwellenwert, ab dem Dürre anhand der Dürreindizes definiert wird, auf 0.25 und die Vorwarnstufe auf mindestens 0.34 hochzusetzen. Wenn die Fehler 1. und 2. Art ungleich gewertet werden sollen, kann eine ROC-Analyse mit entsprechender Gewichtung wiederholt werden.

Neben diesen deutschlandweiten Schwellenwerten wurden in der Boxplotanalyse für die Cluster entsprechende Mediane regional betrachtet. Blauhut et al. (2015) bewies bereits, dass das Dürreerisiko in Europa für verschiedene Auswirkungssektoren und Makroregionen variiert und je nachdem Dürreauswirkungen bei unterschiedlich stark ausgebildeten Anomalien auftreten. In dieser Arbeit konnte über die Betrachtung der regional unterschiedlichen Schwellenwerte für das Auftreten von Dürreauswirkungen demonstriert werden, dass innerhalb von Deutschland Schwellenwerte, ab denen Dürreauswirkungen auftreten, räumlich verschieden ausgeprägt sind. Insgesamt zeigten die Methoden des „Bootstrappings“ und des „Leave-One-Out“, dass die Mediane generell verlässlich sind und geringe Konfidenzintervalle haben. Lediglich für die nordöstlichen Cluster sind in einigen Fällen erhöhte Konfidenzintervalle zu beobachten. Die ermittelten Schwellenwerte müssen in diesen Fällen besonders kritisch betrachtet werden und idealerweise mit einer erweiterten Datenlage der EDII verifiziert werden.

Sowohl für die landwirtschaftliche als auch für die hydrologische Dürre wurde ein räumlicher Trend abfallender Schwellenwerte in Richtung Süden erkenntlich. Hinweise für einen räumlichen Trend der Mediane zeigten sich bereits bei Untersuchungen von Bachmair et al. (2015). Diese Ergebnisse werden von den Untersuchungsbefunden von Blauhut et al. (2016) unterstützt, die für beide Auswirkungsbereiche leicht höhere Dürreerisiken für den Nordosten Deutschlands ermittelten. Neben Einflussfaktoren auf das Dürreerisiko wie die Anpassungsfähigkeit (Gesetzgebung, Dürremanagement, etc.) und Sensitivität (Landnutzung, ökonomische Ressourcen, etc.) (vgl. Blauhut et al. (2016)) der Region kann das absolute jährliche Wasserdargebot und die Speicherkapazität der Böden eine Ursache für verschieden hohe Schwellenwerte sein. In der Betrachtung des Klimas wurde deutlich, dass der Nordosten eine geringere Menge Jahresniederschlag aufweist und dass dort sandige Böden dominant sind, die eine geringe Wasserhaltekapazität aufweisen. Das hat zur Folge,

dass bei gleicher Anomalie die absolute Menge an verfügbarem Wasser deutlich verringert ist. In südwestlichen Regionen, mit hohem Wasserdargebot und hoher Speicherkapazität ist selbst bei stärkeren Anomalien anscheinend noch genügend Wasser verfügbar, um den Bedarf von Pflanzen und Tieren zu decken bzw. Abfluss zu generieren. Im Nordosten hingegen bedeuten offensichtlich selbst schon geringe Anomalien, dass die nutzbare Feldkapazität unterschritten wird. Es treten hier Dürreauswirkungen bereits bei hohen Indexwerten auf.

Besonders auffällig ist das Cluster Nummer 8 (im Nordosten Deutschlands) bei Betrachtung der Schwellenwerte des $SMI_{1.8}$ und auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen. Hier treten bei annähernden Normalbedingungen ($SMI_{1.8}$ nahe 0.5) bereits Dürreauswirkungen auf bzw. fast die Hälfte der beobachteten Auswirkungen treten in Monaten mit Indexwerten ≥ 0.5 auf. Ein Blick in die Wirkungsberichte der EDII stellt heraus, dass die meisten Dürreauswirkungen dieser Region die Schifffahrt betreffen, die aufgrund von Niedrigwasser gezwungen ist, ihre Ladung zu reduzieren. Auch die komplette Schließung von Gewässern für die Schifffahrt tritt wiederholt auf. Als zum Teil internationale Gewässer sind die Bundeswasserstraßen Oder, Havel, Spree und Elbe offensichtlich besonders sensibel gegenüber Dürre. Auch für das Cluster Nummer 4 werden im Vergleich zu umliegenden Clustern höhere Schwellenwerte ermittelt, in dem der Oberrhein als Bundeswasserstraße intensiv genutzt wird und in dem die Schifffahrt häufig von Niedrigwasser betroffen ist (vgl. mit Wirkungsberichten der EDII). Gründe, warum trotz statistisch seltenerer Dürreanomalien der Indizes wiederum keine Auswirkungen auf die Abflussmengen zu beobachten sind, können zum Beispiel anthropogene Eingriffe in die Abflussverhältnisse durch Aufstauen, Umleiten und generelle Abflussregulierung von Gewässern sein (van Loon et al., 2016). Generell interagieren menschliche und natürliche Prozesse auf vielfältige Weise und menschliche Aktivität kann Dürre auch verschlimmern oder hervorrufen, ohne dass natürliche Ursachen vorliegen (vgl. van Loon et al. (2016)). Van Loon et al. (2016) schlagen aufgrund der variablen Einflussnahme des Menschen über das Jahr saisonale Schwellenwerte vor. Saisonal wechselnde Schwellenwerte konnten in dieser Arbeit mangels EDII Einträge in den Herbst- und Wintermonaten jedoch nicht ermittelt werden.

Neben der Schwellenwertbetrachtung anhand der ROC-Analyse wurden AUC-Werte deutschlandweit ermittelt. Dabei zeigen sich höhere Werte für die monatlichen Bodenfeuchteindizes als für die monatlichen SPEIs. Die Bodenfeuchteindizes erweisen sich im Vergleich zu monatliche Anomalien der klimatischen Wasserbilanz als bessere Zeiger für das Auftreten von Dürreauswirkungen (für die landwirtschaftliche Dürre sowie die hydrologische Dürre von Oberflächengewässern). Für kleinräumigere Auflösung fanden Blauhut et al. (2016) für jährliche $SPEI_p$ der maritimen Region Europas und für die Land- und Viehwirtschaft einen AUC von 0.75. Dies liegt in einem ähnlichen Größenbereich wie die hier ermittelten AUC-Werte der monatlichen Bodenfeuchteindizes. Stagge et al. (2015a) konnte über ein logistisches Regressionsmodell mit dem SPEI und SPI als Faktor sowie auch die Interaktion zwischen den beiden Dürreindizes betrachtend höhere AUC-Werte von

6 Diskussion

über 0.9 für die Landwirtschaft auf Länderebene für Deutschland ermitteln. Dies spricht wiederholt dafür, eine Kombination von Indizes zur Dürreklassifikation zu nutzen.

Fokussiert man sich auf die Leistung des SPEI_a im Vergleich zu den anderen Dürreindizes, so fällt auf, dass dieser entgegen der Erwartung einen geringeren AUC-Wert für die Land- und Viehwirtschaft als der SPEI_p und auch einen geringeren AUC-Wert als die Bodenfeuchteindizes zeigt. Der SPEI_a ist am wenigsten als Zeiger für Dürreauswirkungen für diesen Sektor geeignet. Bei Betrachtung der auf Abflussmengen bezogenen Auswirkungen hingegen schneidet der SPEI_a besser ab als der SPEI_p. Eine mögliche Erklärung ist, dass aus den hydrologischen Dürreauswirkungen gezielt hitzebedingte bzw. temperaturbezogene Einträge herausgefiltert und nicht betrachtet wurden. Der SPEI_p ist exponentiell von der Lufttemperatur abhängig und schneidet als Zeiger für die auf Abflussmengen bezogene Auswirkungen daher schlechter ab als der SPEI_a, für dessen Berechnung die Temperatur weniger stark gewichtet wird (Beguería et al., 2014). Die in der EDII berichteten Dürreauswirkungen der Land- und Viehwirtschaft sind nicht nur von Wasserstress sondern zusätzlich von Hitzestress abhängig und werden daher möglicherweise besser vom SPEI_p erfasst. Der Einfluss von Hitze auf Pflanzen ist sehr komplex (Baniwal et al., 2004; Kotak et al., 2007; Reynolds-Henne et al., 2010). Reynolds-Henne et al. (2010) konnte zum Beispiel darlegen, dass die Regulierung der Stomata bei Pflanzen im Zuge von Hitzestress Unterschiede zeigen, je nachdem ob die Pflanze gleichzeitig auch Wasserstress erfährt oder nicht. Generell ist die Bedeutung der Verdunstung für die Entwicklung von Dürre noch unbekannt (van Loon et al., 2016). Teuling et al. (2013) konnten sogar ein Paradoxon von ansteigender Evapotranspiration bei absinkender Wasserverfügbarkeit durch Niederschlag beobachten. Daher gilt es Nachforschungen zur Rolle und zu Rückkopplungseffekten der Lufttemperatur und der Verdunstung für die Entwicklung von Dürreauswirkungen zu betreiben.

Abschließend konnte in der Evaluierung über die Fehler 1. und 2. Art verdeutlicht werden, dass die Fehlalarmquote durch die Anwendung der indexspezifischen deutschlandweiten Schwellenwerte aus Boxplot- und ROC-Analyse ansteigt. Die Verpasserquote, die bei dem bisherigen Schwellenwert sogar über 50% liegt, wird gleichzeitig reduziert. Nun liegt es in der Priorisierung der beiden Fehler, wie die Schwellenwerte genau zu wählen sind.

7 Schlussfolgerungen

Dürre ist eine nicht einheitlich definierte und sehr komplexe Naturkatastrophe, die in ihrer Ursache-Wirkung Beziehung noch nicht vollständig erforscht ist (Dracup, 1991; Pedro-Monzonís et al., 2015; van Loon, 2015; Wilhite und Glantz, 1985). Der Zusammenhang von Dürreindizes und Dürreauswirkungen ist ein essentieller Schlüssel zu einem erfolgreichen Dürremanagement und dem prinzipiellen Verständnis des Phänomens (Ding et al., 2011; Lackstrom et al., 2013; Stahl et al., 2016). In dieser Arbeit werden Bodenfeuchteindizes und klimatische Wasserbilanzindizes des Deutschen Dürremonitors (Marx et al., 2016; Zink et al., 2016) mit Wirkungsberichten von Dürre der European Drought Impact Report Inventory (Stahl et al., 2012; Stahl et al., 2016) kombinierend betrachtet.

Für die Untersuchungen wurden die EDII Wirkungsberichte verschiedener Ebenen auf die NUTS3 Ebene übertragen. Dabei zeigt die Methodik für das Herunterskalieren (ob mit oder ohne Flächengewichtung) kaum Einfluss auf die Zusammenhänge von Dürreindizes und Dürreauswirkungen. Es wird aus Konsistenzgründen zu den bisherigen Auswertungen auf geringer aufgelösten Ebenen empfohlen, das Herunterskalieren ohne Flächengewichtung anzuwenden. Für die Zuordnung von Dürreindizes zu Dürreauswirkungen wird davon abgeraten, den minimalen Indexwert über mehrere Monate zu betrachten. Der Informationsgewinn und die Unsicherheit dieser Zuordnungsvariante stehen nicht im gegenseitigen Verhältnis.

Eine Korrelationsanalyse konnte anhand von zwei Auswirkungsbereichen zeigen, dass sowohl die Bodenfeuchteindizes als auch Niederschlags-Evapotranspirationsindizes des Deutschen Dürremonitors mit der Anzahl an Auswirkungen der EDII auf Landkreisebene in Deutschland schwach bis moderat korreliert sind. Die betrachteten Dürreindizes sind folglich als Zeiger für das Auftreten und die Intensität von Dürre in Deutschland geeignet. Je extremer die Trockenheit, also je extremer die Dürreanomalie der Bodenfeuchte oder der klimatischen Wasserbilanz ist, umso mehr Dürreauswirkungen treten auf und sind in der EDII verzeichnet.

Die besondere Aufmerksamkeit galt hier der Landwirtschaft. Dabei fiel auf, dass Dauerkulturen, Grünflächen und Viehwirtschaft im Vergleich zu einjährigen Kulturen nicht bewässerter Ackerflächen auf Anomalien der Bodenfeuchte erst mehrere Monate nach Intensivierung der Trockenheitsanomalie Dürreauswirkungen zeigen und die Zusammenhänge von Dürreindizes und –auswirkungen schwächer ausgeprägt sind. Diese Effekte sind vermutlich auf Anpassungsstrategien der Pflanzen und Dürremanagement der Viehwirtschaft zurückzuführen (Committee of Agricultural Organisations und General Committee for Agricultural Cooperation, 2003; Farooq et al., 2009; Smith, 1987).

Weiter konnte deutlich gemacht werden, dass auch zwischen meteorologischen und landwirtschaftlichen Dürreindizes ein Korrelationszusammenhang zu hydrologischen Dürreauswirkungen besteht. Einzige Ausnahme betrifft den Nordosten Deutschlands für den Zusammenhang des Bodenfeuchteindex des Gesamtbodens. Es wird angenommen, dass die hydrologischen Gegebenheiten hier durch menschliche Aktivität beeinflusst werden und generell ein hohes Dürrierisiko für die internationale Schifffahrt besteht (vgl. Blauhut et al.,

7 Schlussfolgerungen

2016; van Loon et al., 2016). In der Schwellenwertanalyse wurde für dieses Gebiet deutlich, dass bereits bei geringen Trockenheitsanomalien Auswirkungen auftreten. Dies hängt vermutlich auch mit der geringen Wasserverfügbarkeit (geringe Speicherkapazität der Böden bei gleichzeitig geringem jährlichem Niederschlag) im Nordosten Deutschlands zusammen (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2007, 2017; Deutscher Wetterdienst, 2016).

Entgegen der Erwartungen entsprechend der Dürreausbreitungstheorie (Peters et al., 2003; Stahl, 2001; van Loon et al., 2011; van Loon, 2015) wurde zwischen Dürreindizes und Auswirkungen verschiedener funktionaler Dürretypen kein nennenswerter Zeitversatz ermittelt. Die Dürreausbreitung erfolgt möglicherweise mit Zeitversatz unter einem Monat oder ist aufgrund verschiedenster Einflussfaktoren der Einzugsgebiete (van Loon, 2015) nicht auf Landkreisebene erkenntlich. Insgesamt fiel ein räumlicher Trend des Zusammenhanges ähnlich wie Bachmair et al. (2015) auf. So sind die Korrelationszusammenhänge im Süden / Südwesten oftmals stärker als im Norden / Nordosten, was vor allem auf die unterschiedliche Anzahl an Auswirkungen in der EDII und die verschieden hohen Schwellenwerte für die einzelnen Regionen zurückgeführt werden kann.

Mit diesen Kenntnissen wurde eine Schwellenwertanalyse durchgeführt. Aus dieser Betrachtung ging hervor, dass idealerweise sowohl sektor- als auch indikatorspezifische Schwellenwerte genutzt werden sollten, um Dürre anhand von Dürreindizes zu definieren. Dabei wurde weiter erkenntlich, dass die Land- und Viehwirtschaft im Vergleich zu auf Abflussmengen bezogenen Auswirkungen entsprechend der Dürreausbreitungstheorie bereits bei schwächer ausgeprägten Anomalien Auswirkungen zeigen. Auch räumlich ist zu empfehlen, eine Differenzierung der Schwellenwerte anzuwenden, da die Dürrrisiken regional verschieden sind (Blauhut et al., 2016). Die räumlich differenzierte Betrachtung konnte belegen, dass es innerhalb von Deutschland einen Trend zunehmender Schwellenwerte in Richtung Norden gibt. Im Norden Deutschlands treten bereits bei geringen Anomalien mehr Dürreauswirkungen als im Süden Deutschlands auf. Diese region- und sektorspezifischen Unterschiede sollten im Deutschen Dürremonitor an die jeweiligen Anwender kommuniziert werden. Weiter kann eine Empfehlung ausgesprochen werden, den Schwellenwert, bei dessen Unterschreitung im Deutschen Dürremonitor Dürre definiert wird, hochzusetzen. Aus den hier betrachteten Zusammenhängen sind ein deutschlandweiter Schwellenwert von 0.25 statt 0.2 und eine Vorwarnstufe von mindestens 0.34 statt 0.3 ratsam.

Insgesamt sind die Bodenfeuchteindizes über beide betrachteten Bodentiefen gut als Zeiger für Dürre der beiden betrachteten Wirkungsbereiche geeignet. Die Dürreindizes der klimatischen Wasserbilanzen weisen eine geringere Eignung als Zeiger für das Auftreten von Dürreauswirkungen auf. Vergleicht man die Leistung des SPEI_a mit der Leistung des SPEI_p als Dürreindex, so ergaben sich in der Korrelationsanalyse für den SPEI_a stets geringere Korrelationskoeffizienten. Weiter ist der SPEI_a als Zeiger für Dürreauswirkungen der Land- und Viehwirtschaft laut AUC-Wert der ROC-Analyse weniger verlässlich als der SPEI_p. Für die auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen hat der SPEI_a einen

höheren AUC-Wert im Vergleich zum SPEI_p, jedoch fallen hier deutlich erhöhte Konfidenzintervalle für die Mediane in der Boxplotanalyse auf. Daher wird eine Verwendung des SPEI_a vorerst nicht empfohlen. Die Bedeutung der Verdunstung für die natürlichen Prozesse der Dürreentstehung sollte tiefergehend erforscht werden (Teuling et al., 2013; van Loon et al., 2011). Die Kombination verschiedener Dürreindizes ähnlich wie von Svoboda et al. (2002) oder beispielsweise Sun et al. (2012) oder auch eine Validierung der Ergebnisse des Deutschen Dürremonitors (vgl. Svoboda et al., 2002) sollte in Betracht gezogen werden.

Als Ausblick dieser Arbeit wird unter anderem empfohlen, die hier ermittelten Zusammenhänge mit erweiterter EDII zu wiederholen und dabei ein Augenmerk auf den Einfluss der Standardisierung von Dürreindizes zu legen (Samaniego et al., 2013; Stagge et al., 2015b; Tjiedeman et al., in Bearbeitung). Auch eine Anwendung auf andere Dürreauswirkungsbereiche, sowie die Untersuchung des Dürreerisikos über logistische Regressionen (vgl. Blauhut et al. (2016) und Stagge et al. (2015a)) ist erstrebenswert, um ein noch tiefergreifendes Verständnis für die Auftrittswahrscheinlichkeit von Dürreauswirkungen und Dürreerisiken der einzelnen Landkreise zu erlangen. Zusätzlich ist eine Validierung der hier ermittelten Schwellenwerten wie zum Beispiel die Anwendung für das Jahr 2016 und 2017 mit wachsender EDII zu empfehlen. Eine solche Anwendung der in dieser Arbeit ermittelten Schwellenwerte war mangels Daten zu Dürreauswirkungen für diese Jahre nicht möglich. Besonders bedeutungsvoll ist auch die Analyse im Hinblick auf den Klimawandel, aufgrund dessen Intensität und Länge der Dürren für Zentraleuropa zunehmen (IPCC, 2012). Dies ist auch bereits als Trend sowohl in den Werten der Dürreindizes als auch in der Zunahme der Anzahl an Wirkungsberichten in der EDII festgestellt worden (Samaniego et al., 2013; Stahl et al., 2016). Daher ist es erstrebenswert eine Trendanalyse für den Zusammenhang beider Informationsquellen zu prüfen, um die Gefahr der Dürre auf diverse Sektoren in Zukunft einschätzen zu können.

Literaturverzeichnis

- Alderlieste, M.A.A., van Lanen, H.A.J., 2013. Trends in low flow and drought in selected European areas derived from WATCH forcing data and simulated multi-model mean runoff. Technical Report No.1, Wageningen.
- Andreadis, K.M., Clark, E.A., Wood, A.W., Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P., 2005. Twentieth-Century Drought in the Conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*(6), 985-1001. <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JHM450.1>.
- Bachmair, S., Kohn, I., Stahl, K., 2015. Exploring the link between drought indicators and impacts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15 (6), 1381–1397.
- Bachmair, S., Stahl, K., Collins, K., Hannaford, J., Acreman, M., Svoboda, M., Knutson, C., Smith, K.H., Wall, N., Fuchs, B., Crossman, N.D., Overton, I.C., 2016a. Drought indicators revisited: The need for a wider consideration of environment and society. *WIREs Water* (3-Juli/August), 516–530. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wat2.1154/epdf>.
- Bachmair, S., Svensson, C., Hannaford, J., Barker, L.J., Stahl, K., 2016b. A quantitative analysis to objectively appraise drought indicators and model drought impacts. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (7), 2589–2609.
- Baniwal, S.K., Bharti, K., Chan, Y.J., Fauth, M., Ganguli, A., Kotak, S., Mishra, S.K., Nover, L., Port, M., Scharf, K.-D., Tripp, J., Weber, C., Zielinski, D., Koskull-Döring, P., 2004. Heat stress response in plants: a complex game with chaperones and more than twenty heat stress transcription factors. *Journal of Biosciences* 12/2004 (29), 471–487.
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F., Latorre, B., 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited. Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.* 34 (10), 3001–3023.
- Bernhofer, C., Hänsel, S., Schaller, A., Pluntke, T., 2015. Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit. Untersuchungen zur Erfassung und Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit. Schriftenreihe des Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaates Sachsen (7).
- Bielza Diaz-Caneja, M., Conte, C.G., Gallego Pinilla, Francisco, Javier, Stroblmair, J., Catenaro, R., Dittman, Christoph, 2009. Risk Management and Agricultural Insurance Schemes in Europe. JRC Reference Report 2009. https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31004295/jrc_reference_report_2009_09_agri_ins.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1505209158&Signature=NDLwpjJaXO7ko8BWFhCJ8y0N5qo%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DRisk_Management_and_Agricultural_Insuran.pdf.

- Blauhut, V., Gudmundsson, L., Stahl, K., 2015. Towards pan-European drought risk maps. Quantifying the link between drought indices and reported drought impacts. (Freiburg: Drought R&SPI.). *Environ. Res. Lett.* 10 (1), 14008.
- Blauhut, V., Stahl, K., Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Stefano, L. de, Vogt, J., 2016. Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, drought indices, and vulnerability factors. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (7), 2779–2800.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2007. BGR-Produktcenter. Bodenarten der Oberböden Deutschlands 1:1.000.000. <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/Start.do>. Zuletzt zugegriffen 1.August 2017.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2015. BGR-Produktcenter. Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (HYRAUM). <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/Start.do>. Zuletzt zugegriffen 25.September 2017.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2017. Geoviewer. <https://geoviewer.bgr.de>. Zuletzt zugegriffen 19.November 2017.
- Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). EM-DAT | The international disasters database. <http://www.emdat.be/>. Zuletzt zugegriffen 12.September 2017.
- Chambers, J., Eddy, W., Härdle, W., Sheather, S., Tierney, L., Venables, W.N., Ripley, B.D., 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Springer New York, New York, NY.
- Collins, K., Hannaford, J., Svoboda, M., Knutson, C., Wall, N., Bernadt, T., Crossman, N., Overton, I., Acreman, M., Bachmair, S., Stahl, K., 2016. Stakeholder Coinquiries on Drought Impacts, Monitoring, and Early Warning Systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 97 (11), ES217-ES220.
- Committee of Agricultural Organizations, General Committee for Agricultural Cooperation, 2003. Assessment of the impact of the heat wave and drought of the summer 2003 on agriculture and forestry, Brüssel.
- De Stefano, L., González Tánago, I., Ballesteros, M., Urquijo, J., Blauhut, V., Stagge, J.H., Stahl, K., 2015. Methodological approach considering different factors influencing vulnerability. Pan-european scale. Technical Report No. 26.
2011. Der Aktionsplan Anpassung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Deutscher Wetterdienst, 2016. Zahlen und Fakten zum Klimawandel in Deutschland. Anhang zur DWD-Pressekonferenz am 8.März 2016 in Berlin. Deutscher Wetterdienst, Berlin.
- Ding, Y., Hayes, M.J., Widhalm, M., 2011. Measuring economic impacts of drought. A review and discussion. *Disaster Prev and Management* 20 (4), 434–446.

- Dormann, C.F., 2013. Parametrische Statistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Dracup, J.A., 1991. Drought monitoring. *Stochastic Hydrol Hydraul* 5 (4), 261–266. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F01543134.pdf>.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., Paulson, E.G., 1980. On the definition of droughts. *Water Resour. Res.* 16 (2), 297–302.
- Eltahir, E.A.B., Yeh, P.J.-F., 1999. On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois. *Water Resour. Res.* 35 (4), 1199–1217.
- Europäische Umweltagentur, 2016. Corine Land Cover 2006 raster data. v.18.5.1. <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2006>. Zuletzt zugegriffen 14.November 2017.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A., 2009. Plant drought stress. Effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.* 29 (1), 185–212.
- Federal Emergency Management Agency, 1995. National Mitigation Strategy: Partnerships for Building Safer Communities.
- Fraley, C., Raftery, A., 2007. Model-based Methods of Classification: Using the mclust Software in Chemometrics. *Journal of Statistical Software* (18).
- García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R.M., Luterbacher, J., Fischer, E.M., 2010. A Review of the European Summer Heat Wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 40 (4), 267–306.
- Grundmann, 2010. Analyse und Simulation von Unsicherheiten in der Flächendifferenzierten Niederschlags-Abfluss-Modellierung. Dissertation. Dresdner Schriften zur Hydrologie (8). http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/3777/diss_grundmann_ebook.pdf.
- Hanley, James, A., McNeil, Barbara, J., 1982. The Meaning and Use of the Area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve. *Diagnostic Radiology* (143), 29–36. <http://pubs.rsna.org/doi/pdf/10.1148/radiology.143.1.7063747>.
- Hannaford, J., Lloyd-Hughes, B., Keef, C., Parry, S., Prudhomme, C., 2011. Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit. *Hydrol. Process.* 25 (7), 1146–1162.
- Hao, Z., AghaKouchak, A., Nakhjiri, N., Farahmand, A.eng, 2014. Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific data* 1, 140001.
- Hartmann, C., 2010. Thema des Tages: Weltweites Niederschlagsdefizit. http://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/Weltweites+Niederschlagsdefizit. Zuletzt zugegriffen 21.November 2017.

- Hedderich, J., Sachs, L., 2016. Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Clausen, B., Peters, E., Gustard, A., 2004. Hydrological drought characteristics. *Developments in Water Science* 2004 (48), 139–198.
- Horion, S., Carrão, H., Singleton, A., Barbosa P., Vogt J., 2012. JRC experience on the development of Drought Information Systems. Europe, Africa and latin America. EUR 25235 EN - 2012. Europäische Kommission, Luxembourg.
- IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jarvis, P.G., McNaughton, K.G., 1986. Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region. In: A. MacFayden, E.D. Ford (Editors), *Advances in Ecological Research*. Volume 15. Elsevier textbooks, s.l., pp. 1–49.
- Keil, M., Bock, Michael, Esch, Thomas, Metz, A., Nieland, S., Pfitzner, A., 2011. CORINE Land Cover. Aktualisierung 2006 für Deutschland. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum.
- Keyantash, J., Dracup, J.A., 2002. The Quantification of Drought. An Evaluation of Drought Indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 83 (8), 1167–1180.
- Köppen, W., Geiger, R. (Eds.), 1936. *Handbuch der Klimatologie. Das geographische System der Klimate*. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Kotak, S., Larkindale, J., Lee, U., Koskull-Döring, P. von, Vierling, E., Scharf, K.-D. eng, 2007. Complexity of the heat stress response in plants. *Current opinion in plant biology* 10 (3), 310–316.
- Krzywinski, M., Altman, N. (Eds.), 2014. *Points of Significance. Visualizing samples with box plots*.
- Kulaglic, A., Üstündağ Berk, Bağış, S., 2013. Spatiotemporal Soil Moisture Estimation for Agricultural Drought Risk Management. Second International Conference on IEEE. *Agro-Geoinformatics* 2013, 76–81. <http://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6603437/6621864/06621883.pdf?tp=&arnumber=6621883&isnumber=6621864>.
- Kumar, R., Livneh, B., Samaniego, L., 2013. Toward computationally efficient large-scale hydrologic predictions with a multiscale regionalization scheme. *Water Resour. Res.* 49 (9), 5700–5714.
- Labudová, L., Labuda, M., Takáč, J., 2017. Comparison of SPI and SPEI applicability for drought impact assessment on crop production in the Danubian Lowland and the East Slovakian Lowland. *Theor Appl Climatol* 128 (1-2), 491–506. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00704-016-1870-2.pdf>.

- Lackstrom, K., Brennan, A., Ferguson, D., Crimmins, M., Darby, L., Dow, K., Ingram, K., Meadow, A., Regers, H., Shafer, M., Smith, K., 2013. The Missing Piece: Drought Impacts Monitoring. Workshop report produced by the Carolinas Integrated Sciences & Assessments program and the Climate Assessment for the Southwest. https://www.drought.gov/drought/sites/drought.gov.drought/files/media/resources/workshops/20130305_Drought_Impacts_Monitoring_Tuscon_AZ/Drough_Impacts_Report_June2013_final.pdf.
- Lawrimore, J., Heim, R.R., Svoboda, M., Swail, V., Englehart, P.J., 2002. Beginning a New Era of Drought Monitoring Across North America. A cooperative, multinational effort to improve the monitoring and assessment of climate extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8), 1191–1192.
- Lloyd-Hughes, B., 2014. The impracticality of a universal drought definition. *Theor Appl Climatol* 117 (3-4), 607–611.
- Marx, A., Samaniego Luis, Kumar Rohini, Thober Stephan, Mai Juliane, Zink Matthiasatthias, 2016. Der Dürremonitor. Aktuelle Information zur Bodenfeuchte in Deutschland. *Wasserressourcen – Wissen in Flussgebieten vernetzen, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (37.16), 131–142.
- Mason, S.J., Graham, N.E., 2002. Areas beneath the relative operating characteristics (ROC) and relative operating levels (ROL) curves. Statistical significance and interpretation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 128 (584), 2145–2166.
- McKee, T.B., N. J. Doesken, J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, pp.179-186. - Google Scholar. http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/pdf/paper_spi.pdf. Zuletzt zugegriffen 30.Juni 2017.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391 (1-2), 202–216.
- Moosbrugger, H., Kelava, A.ger, 2012. Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Mott K. A., Parkhurst D. F., 1991. Stomatal responses to humidity in air and helox. *Plant Cell Environ* 14 (5), 509–515.
- Mühr, B., 2008. Wetter, Wolken, Klima - Spezialkarten. Karten zu den mittleren Niederschlagsverhältnissen und mittlere Lufttemperatur in Deutschland. <http://imkhp2.physik.uni-karlsruhe.de/>. Zuletzt zugegriffen 19.November 2017.
- Pedro-Monzonís, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., Paredes-Arquiola, J., 2015. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology* 527, 482–493.

- Peters, E., Torfs, P.J.J.F., van Lanen, H.A.J., Bier, G., 2003. Propagation of drought through groundwater—a new approach using linear reservoir theory. *Hydrol. Process.* 17 (15), 3023–3040.
- Plapp, T., 2004. Wahrnehmung von Risiken aus Naturkatastrophen. Eine empirische Untersuchung in sechs gefährdeten Gebieten Süd- und Westdeutschlands. Verlag Versicherungswirtschaft.
- Potop, V., 2011. Evolution of drought severity and its impact on corn in the Republic of Moldova. *Theor Appl Climatol* 105 (3-4), 469–483. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00704-011-0403-2.pdf>.
- Reim, U., 2005. Wirtschaft und Statistik. Unternehmen der Binnenschifffahrt. Statistische Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.
- Reynolds-Henne, C.E., Langenegger, A., Mani, J., Schenk, N., Zumsteg, A., Feller, U., 2010. Interactions between temperature, drought and stomatal opening in legumes. *Environmental and Experimental Botany* 68 (1), 37–43.
- Robine, J.-M., Cheung, S.L.K., Le Roy, S., van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., Herrmann, F.R., 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes rendus biologies* 331 (2), 171–178.
- Samaniego, L., 2017. Das mesoskalige hydrologische Modell. Beschreibung. <http://www.ufz.de/index.php?en=40114>. Zuletzt zugegriffen 17. Oktober 2017.
- Samaniego, L., Kumar, R., Attinger, S., 2010. Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resour. Res.* 46 (5), 230.
- Samaniego, L., Kumar, R., Zink, M., 2013. Implications of Parameter Uncertainty on Soil Moisture Drought Analysis in Germany. *Journal of Hydrometeorology* (February). <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JHM-D-12-075.1>.
- Sevruk, B., Ondrás, M., Chvíla, B., 2009. The WMO precipitation measurement intercomparisons. *Atmospheric Research* 92 (3), 376–380.
- Sheffield, J., Wood, E.F., 2011. Drought: Past problems and future scenarios. Earthscan.
- Sheffield, J., Wood, E.F., Chaney, N., Guan, K., Sadri, S., Yuan, X., Olang, L., Amani, A., Ali, A., Demuth, S., Ogallo, L., 2014. A Drought Monitoring and Forecasting System for Sub-Sahara African Water Resources and Food Security. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 95 (6), 861–882.
- Smith, J.R., 1987. Tree crops. A permanent agriculture. Island Press, Washington, D.C.
- Stagge, J.H., Kohn, I., Tallaksen, L.M., Stahl, K., 2015a. Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. *Journal of Hydrology* 530, 37–50.

- Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Gudmundsson, L., van Loon, A.F., Stahl, K., 2015b. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *Int. J. Climatol.* 35 (13), 4027–4040.
- Stahl, K., 2001. Hydrological Drought. A study across Europe. Dissertation zur Vergabe des Doktorgrades der Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.
- Stahl, K., Blauhut, V., Kohn, I., Acácio, V., Assimacopoulos, D., Bifulco, C., DeStefano, L., Dias, S., Eilertz, d., Frielingsdorf, B., Jahr Hegdahl, T., Kampragou, E., Kourentzis, V., Melsen, L., van Lanen, H.A.J., van Loon, A.F., Massarutto, A., Musolino, D., Paoli, L. de, Senn, L., Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Urquijo, J., 2012. A European Drought Impact Report Inventory (EDII) : Design and Test for selected recent Droughts in Europe. Technical Report No. 3.
- Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., De Stefano, L., Acácio, V., Dias, S., Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Kampragou, E., van Loon, A.F., Barker, L.J., Melsen, L.A., Bifulco, C., Musolino, D., de Carli, A., Massarutto, A., Assimacopoulos, D., Van Lanen, Henny A. J., 2016. Impacts of European drought events. Insights from an international database of text-based reports. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16 (3), 801–819.
- Stahl, K., Stagge, J.H., Bachmair, S., Blauhut, V., Rego, F.C., Stefano, L. de, Dias, S., Gudmundsson, L., Gunst, L., Kohn, I., van Lanen, H.A.J., Urquijo Reguera, J., Tallaksen, L.M., 2015. Recommendations for indicators for monitoring and early-warning considering different sensitivities: pan-european scale. Technical Report No. 28. https://www.researchgate.net/publication/274309690_Recommendations_for_indicators_for_monitoring_and_early-warning_considering_different_sensitivities_pan-European_scale.
- Statistische Amt der Europäischen Union, 2007. NUTS. NUTS 2003. <http://ec.europa.eu/eurostat/de/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/nuts>.
- Statistische Amt der Europäischen Union, 2015. Regions in the European Union. Nomenclature of territorial units for statistics NUTS 2013/ EU-28. Eurostat Manuals and guidelines. EUROSTAT Manuals and guidelines.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015. Gebiet und Bevölkerung. Fläche und Bevölkerung. Zuletzt zugegriffen 1.August 2017.
- Sun, L., Mitchell, S.W., Davidson, A., 2012. Multiple drought indices for agricultural drought risk assessment on the Canadian prairies. *Int. J. Climatol.* 32 (11), 1628–1639.
- Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., Stephens, S., 2002. The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* (August), 1181–1189.

- Tallaksen, L.M., Hisdal, H., van Lanen, H.A.J., 2009. Space–time modelling of catchment scale drought characteristics. *Journal of Hydrology* 375 (3-4), 363–372.
- Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J., 2006. *Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier, Amsterdam.
- Tannehill, Ivan, Ray, 1947. *Drought. its causes and effects*. Princeton University Press, Princeton.
- Teuling, A.J., van Loon, A.F., Seneviratne, S.I., Lehner, I., Aubinet, M., Heinesch, B., Bernhofer, C., Grünwald, T., Prasse, H., Spank, U., 2013. Evapotranspiration amplifies European summer drought. *Geophys. Res. Lett.* 40 (10), 2071–2075.
- Tijdeman, E., Stahl, K., Tallaksen, L.M., in Bearbeitung. Sensitivity of the Standardized Streamflow Index to the choice of probability distribution and fitting method.
- Todini, E., 2007. A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (5), 1645–1659.
- Trnka, M., Hlavika, P., Semerádová, D., Balek, J., Moožný, M., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Hayes, M., Eitzinger, J., Žalud, Z., 2014. Drought monitor for the Czech Republic. www.intersucho.cz. *Mendel a bioklimatologie* (9), 630–638.
- van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *WIREs Water* 2 (4), 359–392.
- van Loon, A.F., Stahl, K., Di Baldassarre, G., Clark, J., Rangecroft, S., Wanders, N., Gleeson, T., van Dijk, A.I.J.M., Tallaksen, L.M., Hannaford, J., Uijlenhoet, R., Teuling, A.J., Hannah, D.M., Sheffield, J., Svoboda, M., Verbeiren, B., Wagener, T., Van Lanen, Henny A. J., 2016. Drought in a human-modified world. Reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (9), 3631–3650.
- van Loon, A.F., van Lanen, H.A.J., Tallaksen, L.M., Hanel, M., Fendeková, M., Machlica, A., Sapriza, G., Koutroulis, A., van Huijgevoort, H.J., Bermúdez, J.J., Hisdal, H., Tsanis Ioannis, 2011. Propagation Of Drought Through The Hydrological Cycle. Technical Report No. 31. WATCH. <http://www.eu-watch.org/media/default.aspx/emma/org/10720479/Technical+Report+Number+31+Propagation+of+Drought+through+the+Hydrological+Cycle.pdf>.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming. The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23 (7), 1696–1718.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J.J., López-Moreno, J.I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., Sanchez-Lorenzo, A., 2012. Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interact.* 16 (10), 1–27. <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2012EI000434.1>.
- Wilhite, D.A., 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. Chapter 1. *Drought: A Global Assessment (Volume I)*, 3–18.

- Wilhite, D.A., Glantz, M.H., 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* (10:3), 111–120.
- Wong, G., van Lanen, H.A.J., Torfs, P.J.J.F., 2013. Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought. *Hydrological Sciences Journal* 58 (2), 253–270.
- Wu, H., Soh, L.K., Samal, A., Hong, T., Marx, D., Chen, X., 2009. Upstream-Downstream Relationships in Terms of Annual Streamflow Discharges and Drought Events in Nebraska. *JWARP* 01 (05), 299–315.
- Yevjevich, V., 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers Colorado State University* August 1967 (23).
- Youden, W.J., 1950. Index for rating diagnostic tests. *Cancer* 3 (1), 32–35.
- Zampieri, M., D’Andrea, F., Vautard, R., Ciais, P., Noblet-Ducoudré, N. de, Yiou, P., 2009. Hot European Summers and the Role of Soil Moisture in the Propagation of Mediterranean Drought. *J. Climate* 22 (18), 4747–4758.
- Zink, M., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., Schäfer, D., Marx, A., 2016. The German drought monitor. *Environ. Res. Lett.* 11 (7), 74002. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/7/074002/pdf>.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Walker, N., Saveliev, A.A., Smith, G.M. (Eds.), 2009. *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer New York, New York, NY.

Bildquellen

- 1 Anuragrana18, 2011. Sun. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bright-sun.jpg>. Zuletzt geprüft 7. Dezember 2017.
- 2 Leistert, H., 2017. Dreisam im Sommer 2003 westlich von Lehen. Dürreperiode 2003. http://www.hydrology.uni-freiburg.de/aktuell/dreisam/duerre_03.html. Zuletzt geprüft 7. Dezember 2017.

Anhang

Anhang I

Tabelle 7: Übersicht der Klassifikation von Auswirkungssektoren und jeweiligen Kategorien sowie in dieser Arbeit betrachteten Auswirkungsbereichen (übersetzt und verändert mit Blauhut nach Stahl et al. (2012)).

Sektor	Kategorie Nr.	Kategorie Beschreibung
1 Land- & Viehwirtschaft	1.1 CL	Reduzierte Produktivität der Anbaufläche jährlicher Fruchtkulturen: Ernteverluste, Schäden an der Erntequalität oder Ernteausschlag durch Absterben der Pflanzen, vorzeitige Reifung, Dürre-induzierte Schädlingsbefall oder Krankheiten etc.
	1.2 RLVW	Reduzierte Produktivität von Dauerfruchtkulturen
	1.3 CL (ohne Dauerkultur)	Landwirtschaftliche Ertragsverluste > = 30% der Normalproduktion (Grenzwert für EU-Schadensausgleich)
	1.4 RLVW	Verringerte Wasserverfügbarkeit zur Bewässerung
	1.5 RLVW	Reduzierte Produktivität der Viehzucht (z. B. reduzierte Milcherträge oder Qualität der Milch, reduzierte Mast- / Produktionsraten[kg])
	1.6 RLVW	Verringerung der Viehbestände : vorzeitiger Verkauf/Schlachtung (z.B. aufgrund von Futtermangel)
	1.7 RLVW	Regionale Wasser und Futtermittelknappheit für die Viehzucht
	1.8 RLVW	Sonstiges
	1.9 RLVW	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
2 Forst	2.1	Reduziertes Baumwachstum und Vitalität
	2.2	Abnahme der jährlichen Erträge von „Nicht-Holzprodukte“ aus Wäldern (z. B. Kork, Pinienkernen, Pilze, Beeren usw.)
	2.3	Erhöhtes Auftreten von Wassermangelindikatoren und Symptomen von Trockenheitsschäden (z. B. vorzeitige Reifung, vorzeitige Entlaubung, verschlechterte Kronenverhältnisse etc.)
	2.4	Erhöhung der Schädlings- und Krankheitsbefälle auf Bäume (Wenn möglich Baumart spezifizieren)
	2.5	Erhöhtes Baumsterben (Wenn möglich Baumart spezifizieren)
	2.6	Erhöhtes Absterben gepflanzter Baumsetzlinge (in Baumschulen sowie aufgeforsteten Gebieten)

Sektor	Kategorie Nr.	Kategorie Beschreibung
	2.7	Schäden an forstlichen Kurzumtriebsplantagen (Energie Forstwirtschaft)
	2.8	Sonstiges
	2.9	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
3 Wasserkulturen und Fischerei	3.1	Reduzierte (Süßwasser-) Fischereiproduktion (Wenn möglich bitte Arten spezifizieren)
	3.2	Reduzierte Produktion in Aquakulturen (Wenn möglich bitte die Kulturen spezifizieren)
	3.3	Sonstiges
	3.4	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
4 Energie & Industrie	4.1 R (ohne Hitze Effekte)	Reduzierte Wasserkraftproduktion
	4.2 R (ohne Hitze Effekte)	Beeinträchtigte Produktion / Stilllegung von thermischen / nuklearen Kraftwerken (aufgrund fehlender Kühlwasser- und / oder Umweltgesetzgebung für Einleitungen in Gewässer)
	4.3 R (ohne Hitze Effekte)	Beschränkung / Störung des industriellen Produktionsprozesses (wegen mangelnder Prozesswasser- und / oder Umweltgesetzgebung / Einschränkungen für Einleitungen in Gewässer)
	4.4	Sonstiges
	4.5	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
5 Schifffahrt	5.1 R	Beeinträchtigungen für die Schifffahrt auf Fließgewässern (Verringerung der Lasten, erhöhter Bedarf an Zwischenlagerung von Gütern in Häfen)
	5.2 R	Gewässer für die Navigation geschlossen
	5.3 R	Sonstiges
	5.4 R	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
6 Tourismus & Naherholung	6.1	Reduzierte Anzahl von Kurzaufenthaltstouristen
	6.2	Reduzierte Anzahl von Langzeittouristen
	6.3	Sport- / Erholungseinrichtungen von einem Mangel an Wasser betroffen
	6.4	Beeinträchtigte Nutzung / Navigierbarkeit von Oberflächengewässern für Wassersportaktivitäten (einschließlich Verbote)
	6.5	Sonstiges
	6.6	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
7 Öffent- liche	7.1	Lokale Engpässe/Probleme in der Wasserversorgung (Austrocknung von Quellen / Brunnen, Stauseen, Bächen)

Sektor	Kategorie Nr.	Kategorie Beschreibung
	7.2	Regionale / Überregionale Engpässe/Probleme in der Wasserversorgung (Austrocknung von Quellen / Brunnen, Stauseen, Bächen)
	7.3	Verbot der privaten sowie öffentlichen Wassernutzung (z. B. Autowaschen, Bewässerung des Rasens / Gartens, Bewässerung von Sportfeldern, Befüllung von Schwimmbädern)
	7.4	Einschränkungen der Wasserversorgung von Haushalten in ländlichen Gebieten (Verringerte Wasserversorgung, Sicherstellung der Wasserversorgung durch Notfallmaßnahmen)
	7.5	Einschränkungen der Wasserversorgung von Haushalten in städtischen Gebieten (Verringerte Wasserversorgung, Sicherstellung der Wasserversorgung durch Notfallmaßnahmen)
	7.6	Sonstiges
	7.7	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
8 Wasserqualität	8.1	Erhöhte Temperatur in Oberflächengewässern (nahe bzw. überschreiten kritischer Grenzwerte)
	8.2	(Vorübergehende) Wasserqualitätsverschlechterung / Probleme der Oberflächengewässer (natürlich & künstlich); z.B. signifikante Veränderung der physiochemischen Indikatoren, erhöhte Konzentrationen von Schadstoffen, verminderte Sauerstoffsättigungswerte, Eutrophierung, Algenblüte)
	8.3	(Vorübergehende) Beeinträchtigung des ökologischen Zustands von Oberflächengewässern (nach EU-Wasserrahmenrichtlinie)
	8.4	(Vorübergehende) Beeinträchtigung des chemischen Zustands von Oberflächengewässern (nach EU-Wasserrahmenrichtlinie)
	8.5	Erhöhter Salzgehalt von Oberflächengewässern (Salzwasserintrusion und Auswirkungen auf Mündungszonen)
	8.6	Probleme mit der Grundwasserqualität
	8.7	Erhöhter Salzgehalt des Grundwassers
	8.8	Probleme mit der Trinkwasserqualität (z. B. erhöhte Aufbereitungsaufwand, Verletzung von festgelegten Richtwerten)
	8.9	Probleme mit der Badegewässerqualität
	8.10	Probleme mit der Bewässerungswasserqualität
	8.11	Probleme mit der Wasserqualität für die Verwendung in industriellen Produktionsprozessen
	8.12	Sonstiges
	8.13	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
9 Aquatische Ökosysteme	9.1 R (ohne Hitze Effekte)	Erhöhte Sterblichkeit aquatischer Spezies (Wenn möglich bitte Spezies spezifizieren)

Sektor	Kategorie Nr.	Kategorie Beschreibung
	9.2	Erhöhte Artenkonzentration in der Nähe von Gewässern (Wenn möglich bitte Spezies spezifizieren)
	9.3	Migration und Konzentration (Verlust von Wildtieren in einigen Gebieten und zu viele in anderen)
	9.4	Erhöhte Populationen von invasiven (exotischen) aquatischen Arten
	9.5	Beobachtung von nachteiligen Auswirkungen auf Populationen von gefährdeten/ geschützten Arten der Uferzonen
	9.6	Beobachtung von nachteiligen Auswirkungen auf Populationen von gefährdeten/ geschützten Arten von Feuchtgebieten/ Sümpfen
	9.7	Verlust der Biodiversität (Abnahme der Artenvielfalt)
	9.8 R	Gefahr oder tatsächliche Verletzung der Mindestrestwassermenge / ökologischen Restwassermenge
	9.9	Austrocknen von flachen Wasserflächen, Unkrautwachstum oder Algenblüte
	9.10	Austrocknen von perennierenden Fließgewässerabschnitten
	9.11	Austrocknen von Seen und Stauseen (die eine Lebensraumfunktion haben)
	9.12	(Mittel- / langfristige) Verschlechterung/ Verfall von Feuchtgebiete / Sümpfen
	9.13	Irreversible Verschlechterung / Verlust von Feuchtgebieten/ Sümpfen
	9.14	Sonstiges
	9.15	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
10 terrestrische Ökosysteme	10.1	Erhöhte Artenmortalität (Wenn möglich bitte Spezies spezifizieren)
	10.2	Wandel der Artenbiologie / Ökologie
	10.3	Verlust der Biodiversität (Abnahme der Artenvielfalt)
	10.4	Verschiebung der Artenzusammensetzung
	10.5	Reduziertes Pflanzenwachstum
	10.6	(Mittel- / langfristige) Verschlechterung der Lebensräume
	10.7	Irreversible Verschlechterung / Verlust von Lebensräumen
	10.8	Mangel an Futter / Wasser für terrestrische Wildtiere
	10.9	Erhöhte Befall durch Schädlinge und Krankheiten
	10.10	Erhöhter Kontakt von Wildtieren unter Stress (Knappheit / Mangel an Futter und Wasser) mit Menschen / menschlichen Siedlungen
	10.11	Sonstiges
	10.12	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
11 Bodensysteme	11.1	Dürre-bedingte Erosionsprozesse (Verlust der Bodenfruchtbarkeit)
	11.2	Strukturelle Schäden an Privateigentum durch Bodenabsenkung / Schrumpfung

Sektor	Kategorie Nr.	Kategorie Beschreibung
	11.3	Strukturelle Schäden an Infrastrukturen durch Bodenabsenkung / Schrumpfung
	11.4	Sonstiges
	11.5	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
12 Waldbrände	12.1	Zunahme verbrannter Flächen
	12.2	Anstieg der Anzahl von Flächenbränden
	12.3	Zunahme der Intensität von Flächenbränden
	12.5	Sonstiges
	12.6	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
13 Luftqualität	13.1	Luftverschmutzung/ Luftqualitätsprobleme (Staubstürme, Waldbrände, Ersatz der Wasserkraft Produktion durch fossile Energie)
	13.2	Sonstiges
	13.3	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
14 Gesundheit & Sicherheit	14.1	Hitze-Stress-Probleme (wenn Dürre mit einer Hitzewelle verbunden ist)
	14.2	Erhöhte Atemwegserkrankungen (Hitzewelle und Luftqualität)
	14.3	Höhere Sterblichkeitsraten bei Hitzewellen
	14.4	Dürreinduzierte Probleme der öffentlichen Sicherheit (z. B. erhöhtes Risiko für strukturelle Schäden)
	14.5	Sonstiges
	14.6	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste
15 Konflikte	15.1	Wasserverteilungskonflikte - international
	15.2	Regionale / lokale Konflikte zwischen Wassernutzern
	15.3	Sonstiges
	15.4	Steigende Kosten/ ökonomische Verluste

Anhang II

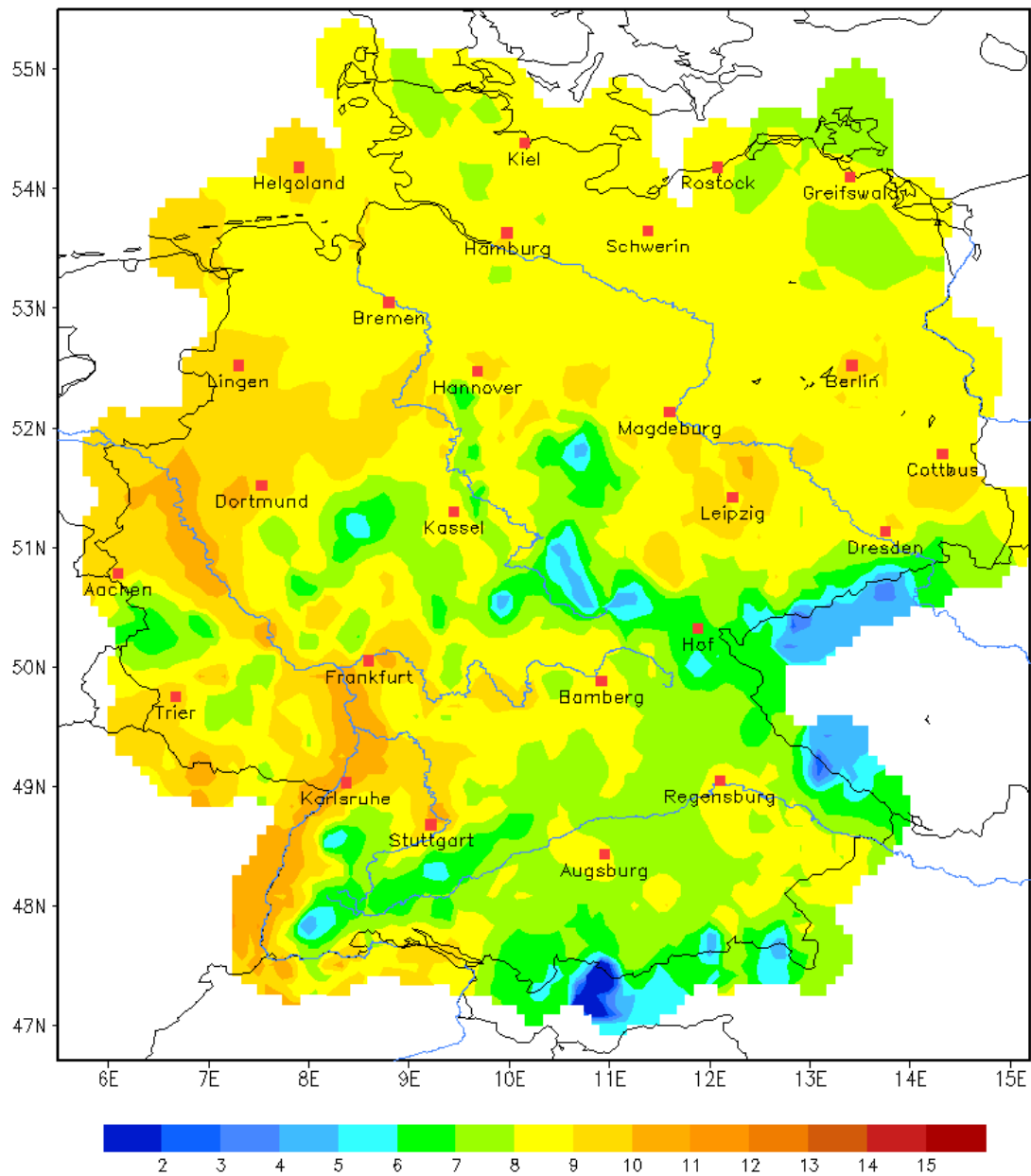


Abbildung 28: mittlere Lufttemperatur im Jahr [°C] für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach Mühr (2008).

Tabelle 8: Bodenfläche pro Bundesland in km² (einschließlich des gemeinschaftlichen deutsch-luxemburgischen Hoheitsgebietes) sowie jeweiliger Anteil der Landnutzung pro Bundesland in % (verändert nach Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2015a).

Bundesland	31.12.2015				
	Boden-	darunter Flächenanteil pro Bundesland für			
	fläche	Siedlungs- und Verkehrs- fläche	Landwirt- schafts- fläche	Wald- fläche	Wasser- fläche
	insgesamt				
	[km ²]				
Baden- Württemberg	35751	14%	45%	38%	1%
Bayern	70550	12%	47%	36%	2%
Berlin	892	70%	4%	18%	7%
Brandenburg	29654	9%	49%	36%	3%
Bremen	420	56%	29%	2%	12%
Hamburg	755	59%	25%	7%	8%
Hessen	21115	16%	42%	40%	1%
Mecklenburg- Vorpommern	23213	8%	62%	22%	6%
Niedersachsen	47616	14%	60%	22%	2%
Nordrhein- Westfalen	34113	23%	48%	26%	2%
Rheinland- Pfalz	19854	14%	42%	42%	1%
Saarland	2570	21%	43%	34%	1%
Sachsen	18449	13%	55%	27%	2%
Sachsen- Anhalt	20452	11%	61%	25%	2%
Schleswig- Holstein	15803	13%	70%	11%	5%
Thüringen	16202	10%	55%	33%	1%
Deutschland	357409	14%	52%	31%	2%

Tabelle 9: Unterteilung der CORINE Landnutzungsklassen der Landwirtschaft (Keil et al., 2011). In grau hinterlegte Kategorien kommen in Deutschland nicht vor.

2. Landwirtschaft	2.1 Ackerflächen	2.1.1. Nicht bewässertes Ackerland
		2.1.2. Regelmäßig bewässertes Ackerland
		2.1.3. Reisfelder
	2.2. Dauerkulturen	2.2.1. Weinbauchflächen
		2.2.2. Obst/Beerenobstbestände
		2.2.3. Olivenheine
	2.3. Grünland	2.3.1. Wiesen und Weiden
	2.4. Heterogene landwirtschaftliche Flächen	2.4.1. Einjähr. Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen
		2.4.2. Komplexe Parzellenstruktur
		2.4.3. Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Vegetation von signifikanter Größe
		2.4.4. Land/Forstwirtschaftliche Flächen

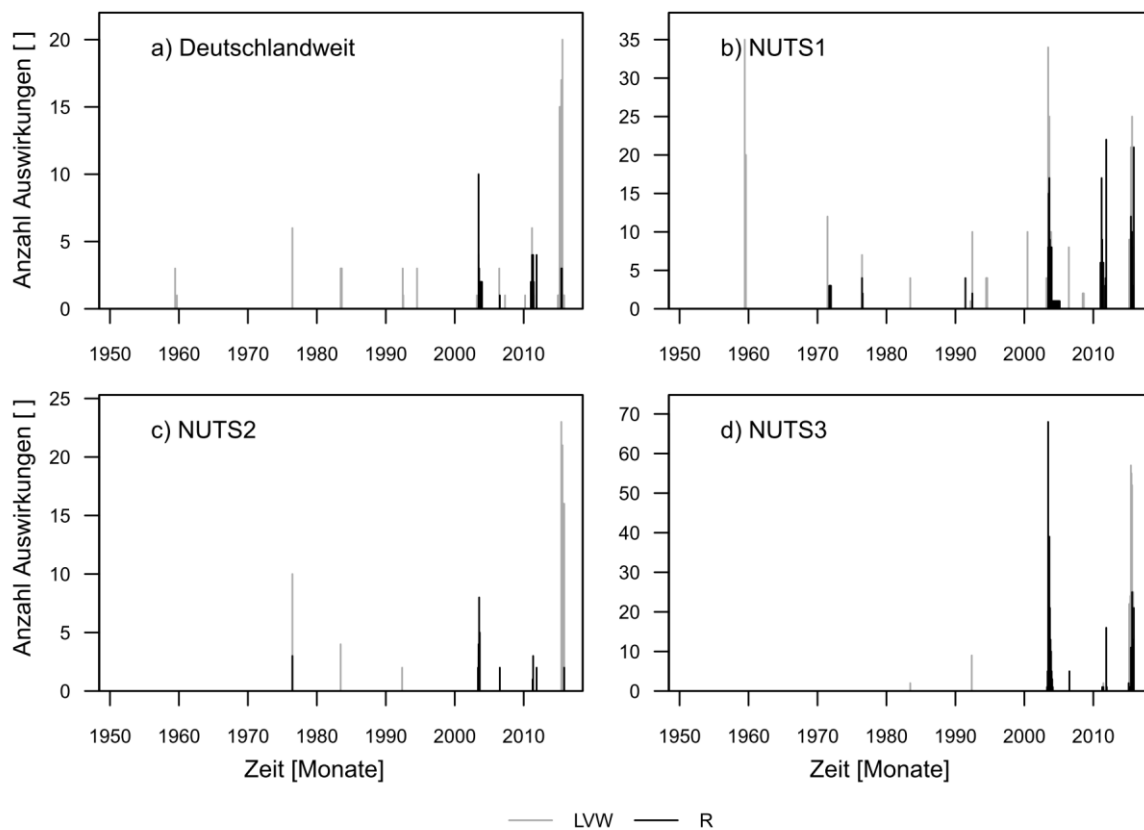


Abbildung 29: zeitliche Variabilität der Anzahl von auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen (I_R) zu vieh- und landwirtschaftlichen Dürreauswirkungen (I_{LVW}) von Januar 1951 bis Dezember 2015 pro Monat für das gesamte deutsche Gebiet aufsummiert. Zu beachten ist, dass die y-Achsen der Abbildungen a)-d) unterschiedliche Spannweiten haben.

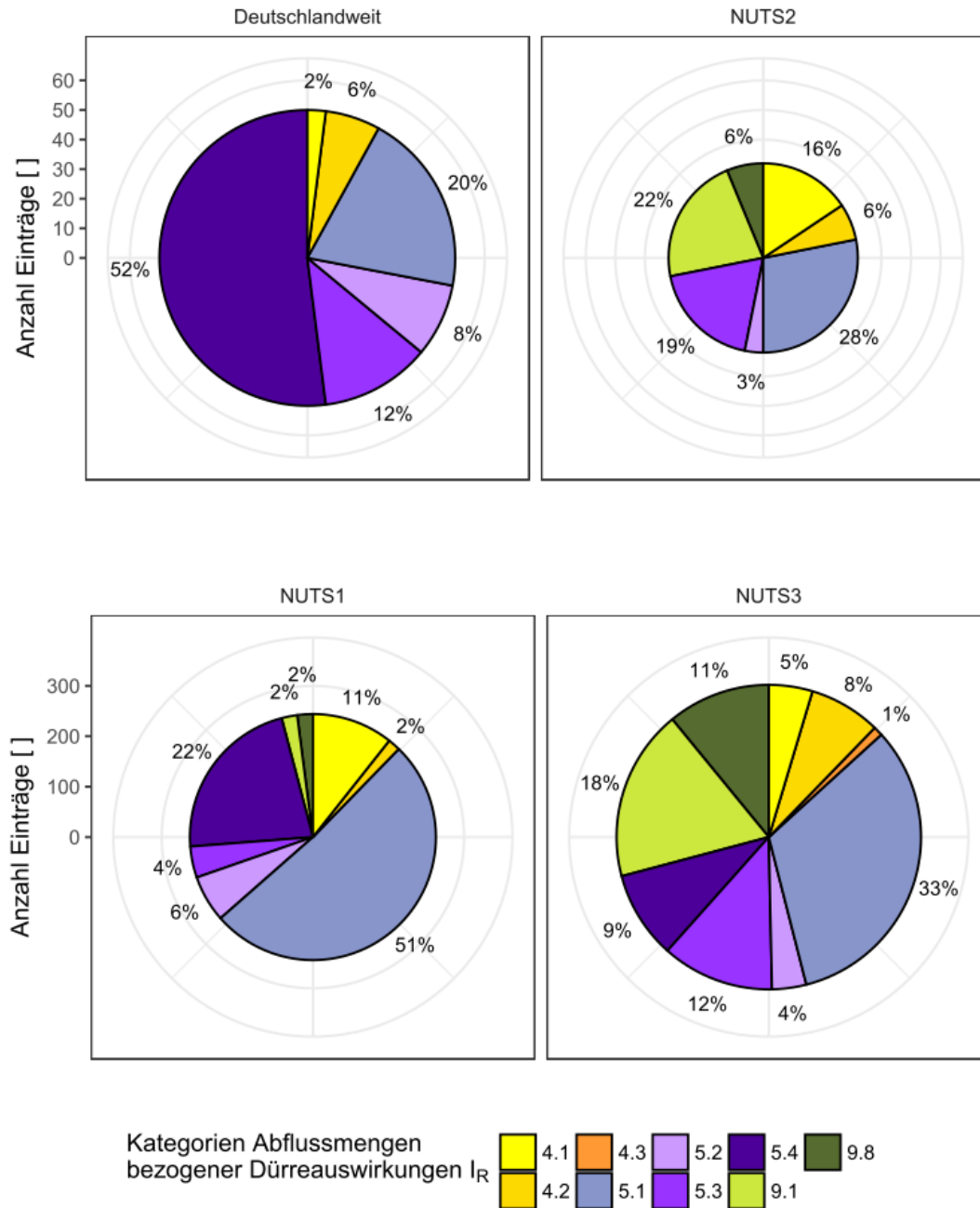


Abbildung 30: Kuchendiagramme der Anteile der berichteten Dürreauswirkungen einzelner Kategorien entsprechend Anhang I Tabelle 7 an den gesamten auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen. Größe je nach Anzahl an Auswirkungen auf den kleinsten bestimmaren räumlichen Ebenen.

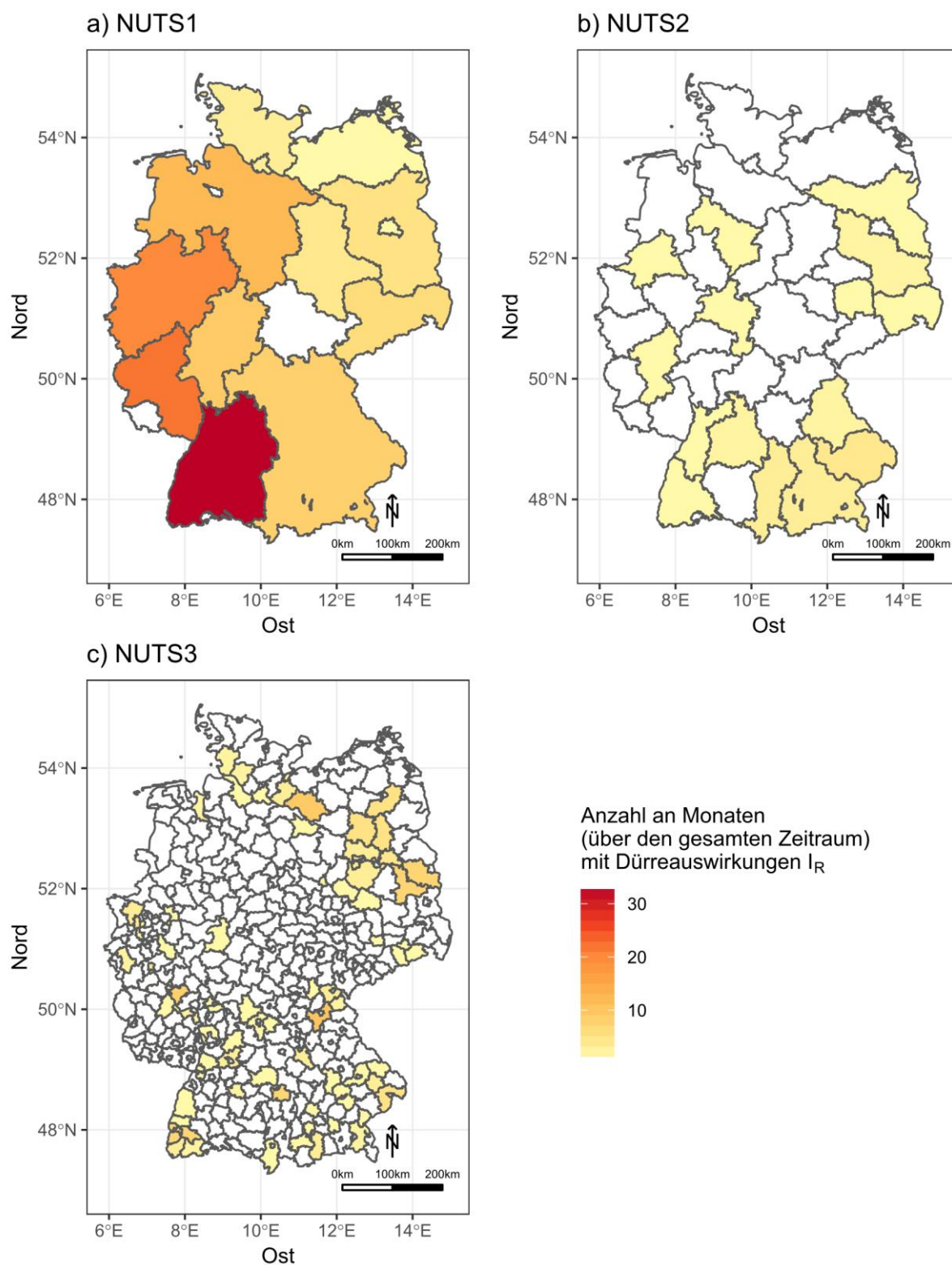


Abbildung 31: Darstellung der Anzahl an Monaten der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R auf den kleinsten bestimmaren Ebenen (von Januar 1951 bis Dezember 2015). Weiße NUTS Regionen zeigen an, dass keine Dürreauswirkungen in der EDII beschrieben werden.

Anhang III

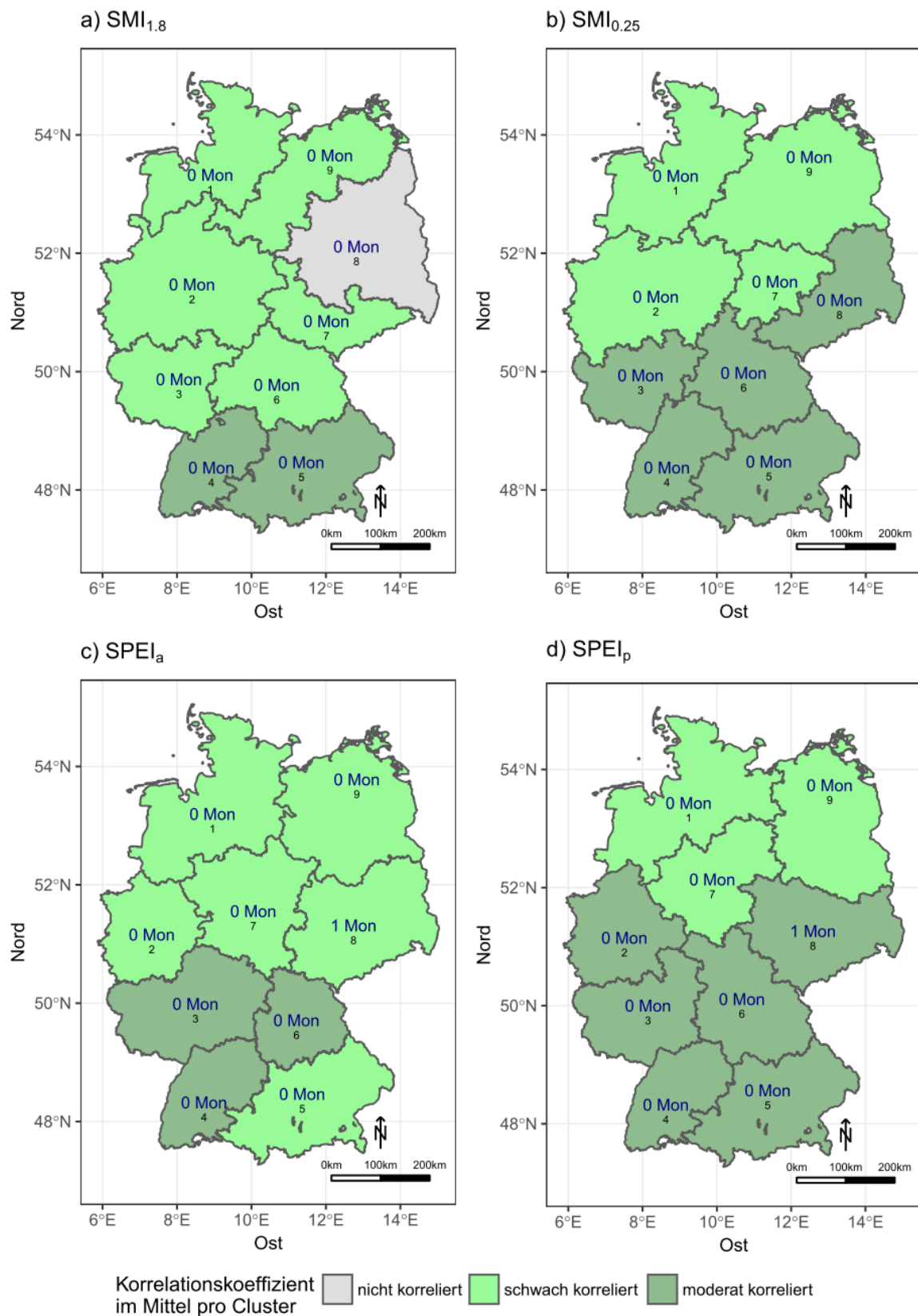


Abbildung 32: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und **dem Auftreten der skalierten land- und viehwirtschaftlichen Dürreauswirkungen I_{LVW} ohne Minimumoption**. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkennlich.

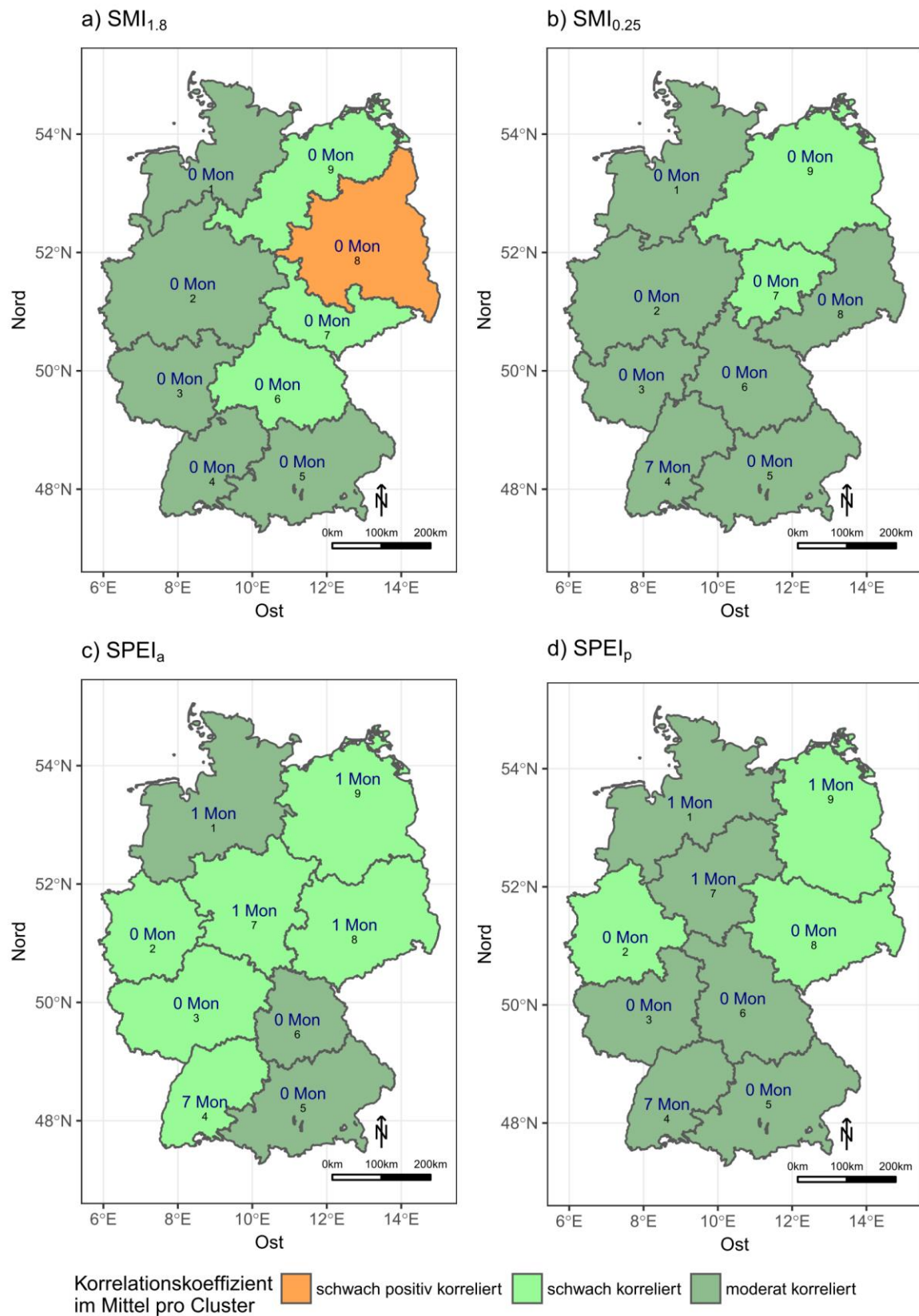


Abbildung 33: Mittlere Korrelationskoeffizienten pro Cluster $\bar{R}$ für die beste Korrelationsvariante zwischen den Dürreindizes und **dem Auftreten der skalierten auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R ohne Minimumoption**. Entsprechender Zeitversatz der besten Korrelationsvariante in Monaten in blauer Schrift, in schwarzer Schrift die Clusternummer erkennlich.

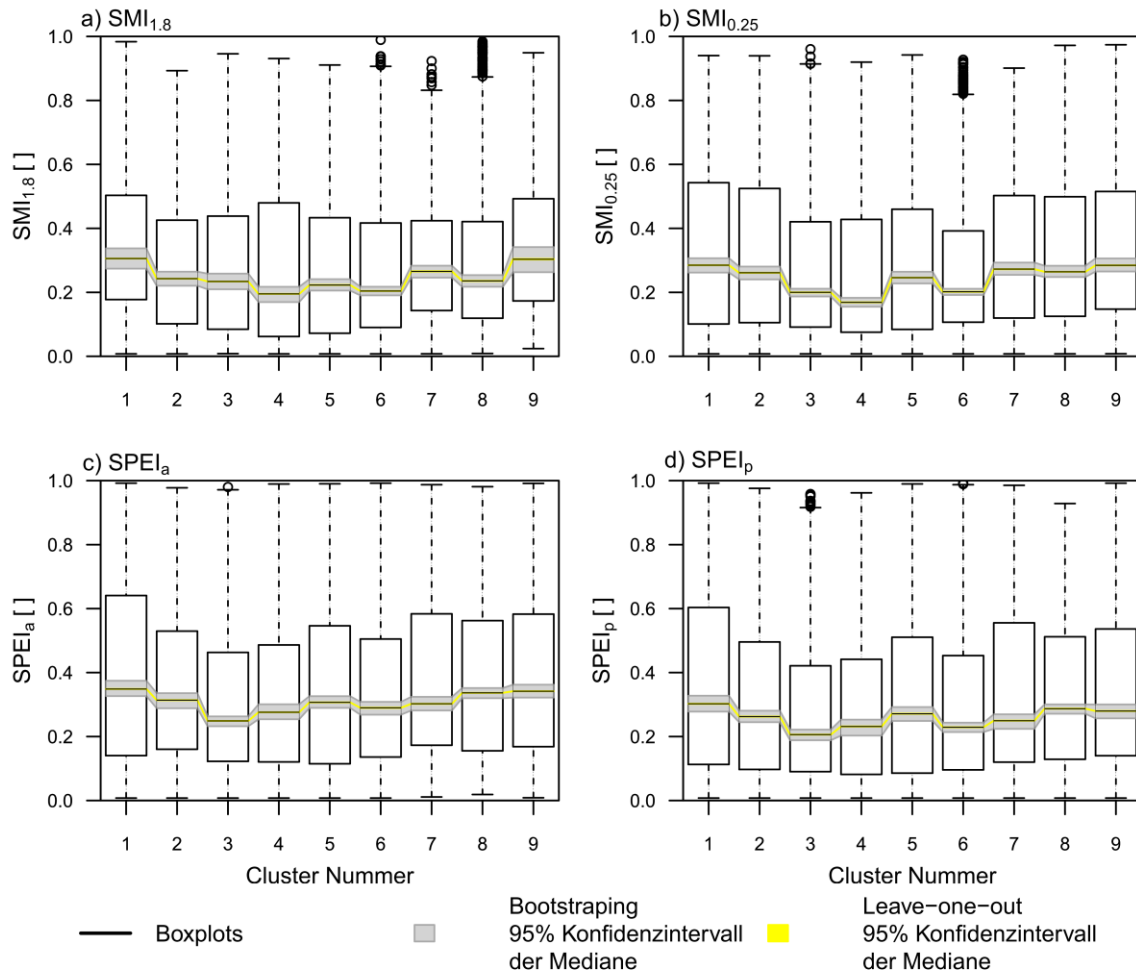


Abbildung 34: Cluster und indexspezifische Boxplots sowie die 95% Konfidenzintervalle der Mediane für die Verteilungen der Dürreindizes in Monaten mit Auftreten von Dürreauswirkungen bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Auswirkungsdaten der Land- und Viehwirtschaft I_{LW} .

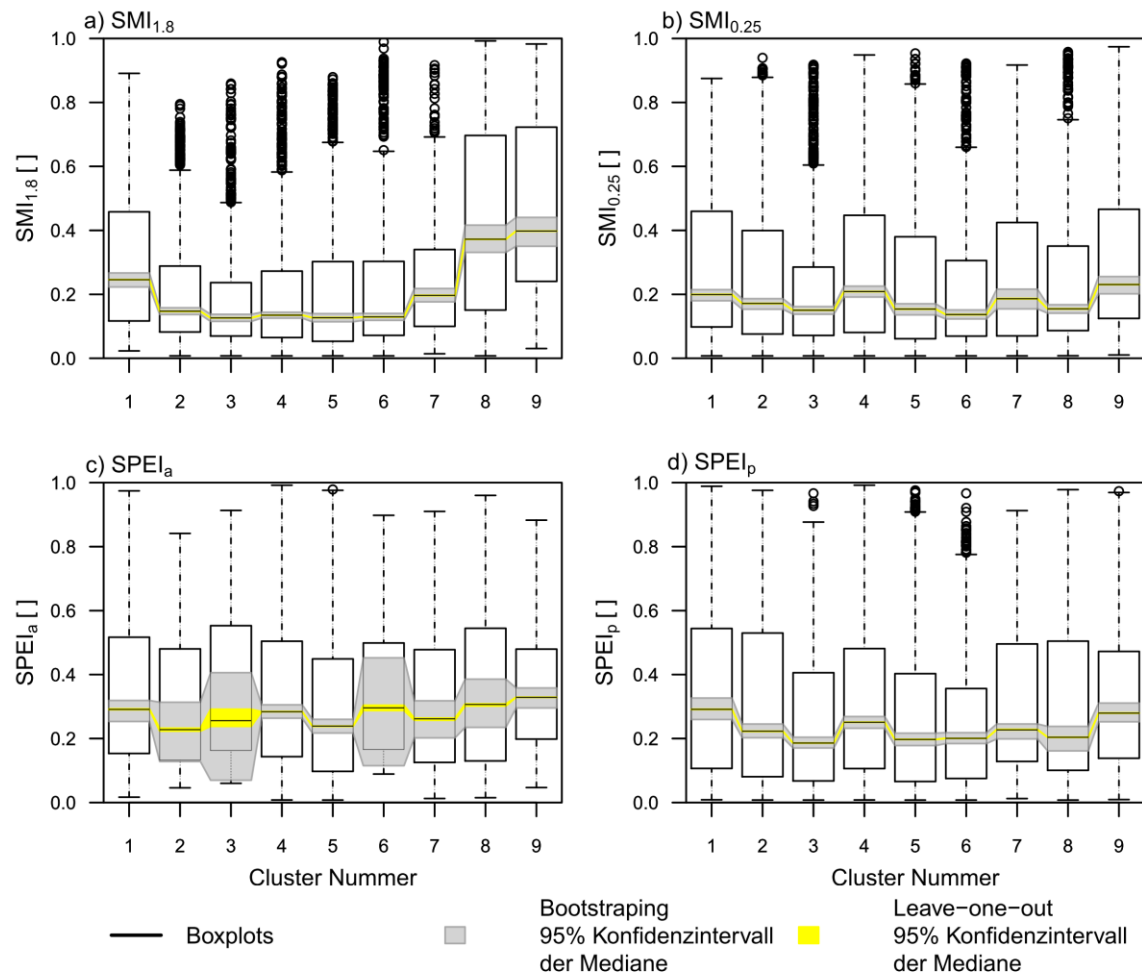


Abbildung 35: Cluster und indexspezifische Boxplots sowie die 95% Konfidenzintervalle der Mediane für die Verteilungen der Dürreindizes in Monaten mit Auftreten von Dürreauswirkungen bei Zuordnung mit dem ermitteltem clusterspezifischem Zeitversatz aus der Korrelationsanalyse ohne Minimumoption und ohne Flächengewichtung herunterskalierte Auswirkungsdaten der auf Abflussmengen bezogenen Dürreauswirkungen I_R .

Anhang

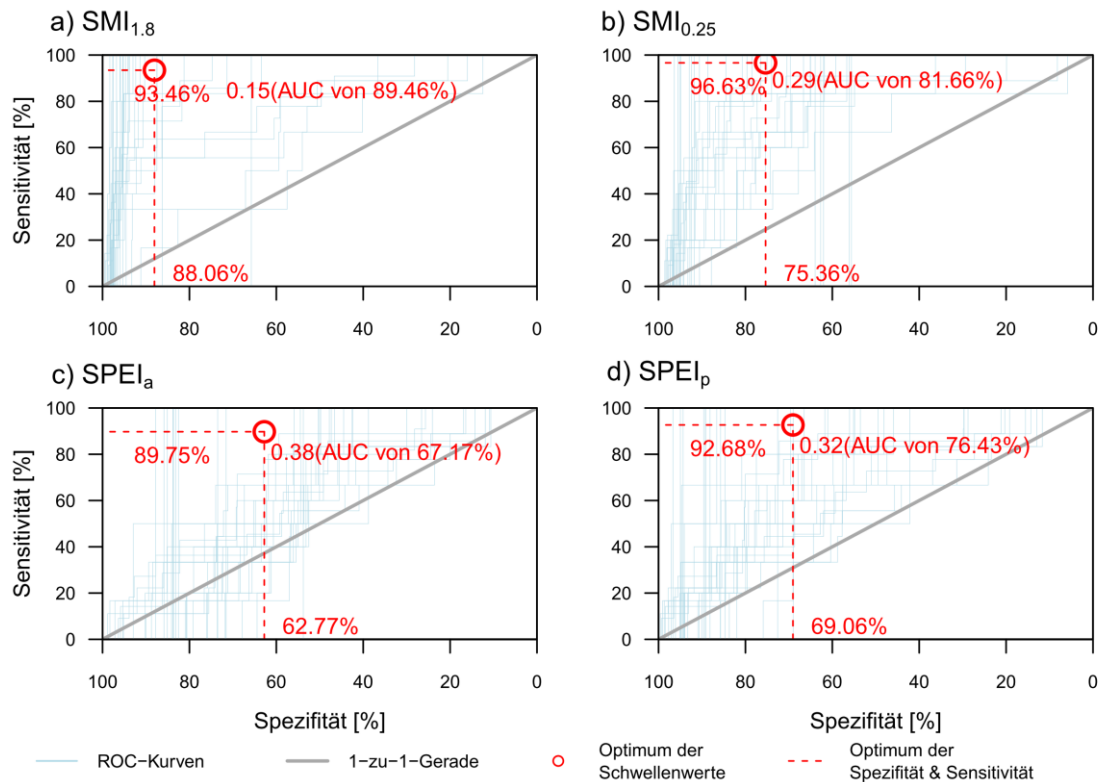


Abbildung 36: ROC-Kurven für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang bei Nutzung der ohne Flächengewichtung NUTS3 Originaldaten der Land- und Viehwirtschaft I_{LVW} . Mittlerer idealer Schwellenwert, mittlere AUC-Werte sowie mittlere Sensitivität und Spezifität für Gesamtdeutschland in rot markiert.

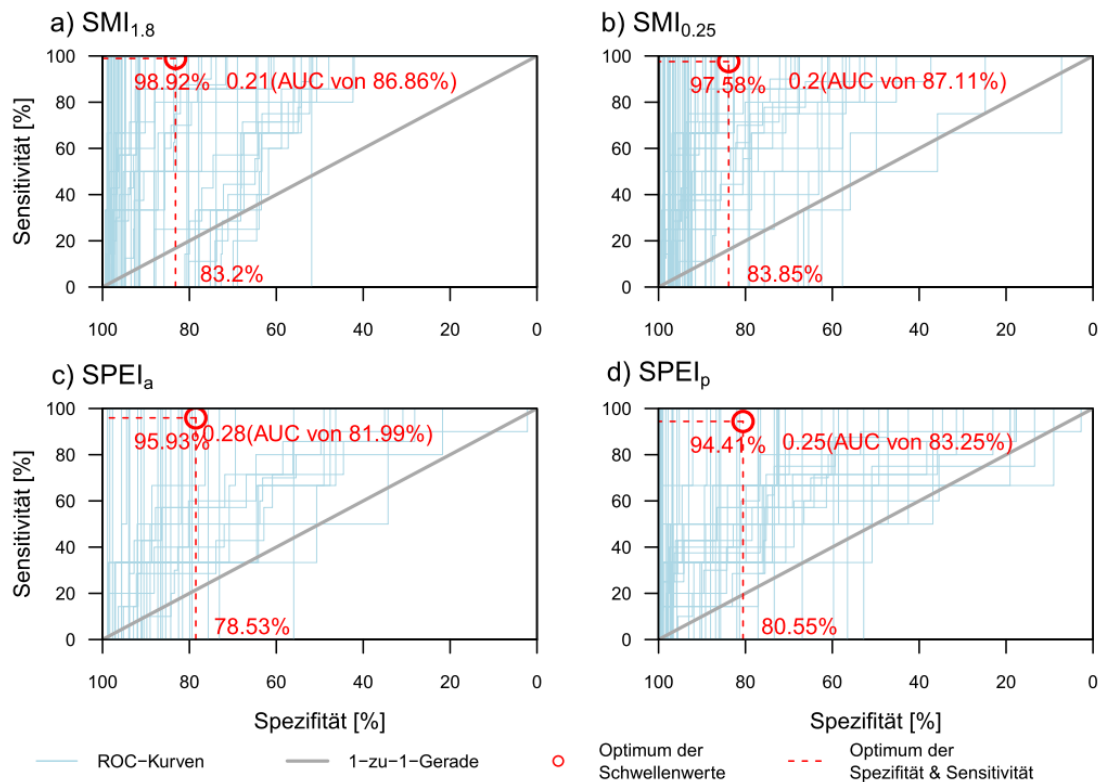


Abbildung 37: ROC-Kurven für alle NUTS3 mit signifikantem Korrelationszusammenhang bei Nutzung der ohne Flächengewichtung NUTS3 Originaldaten der Land- und Viehwirtschaft I_R . Mittlerer idealer Schwellenwert, mittlere AUC-Werte sowie mittlere Sensitivität und Spezifität für Gesamtdeutschland in rot markiert.

Anhang IV

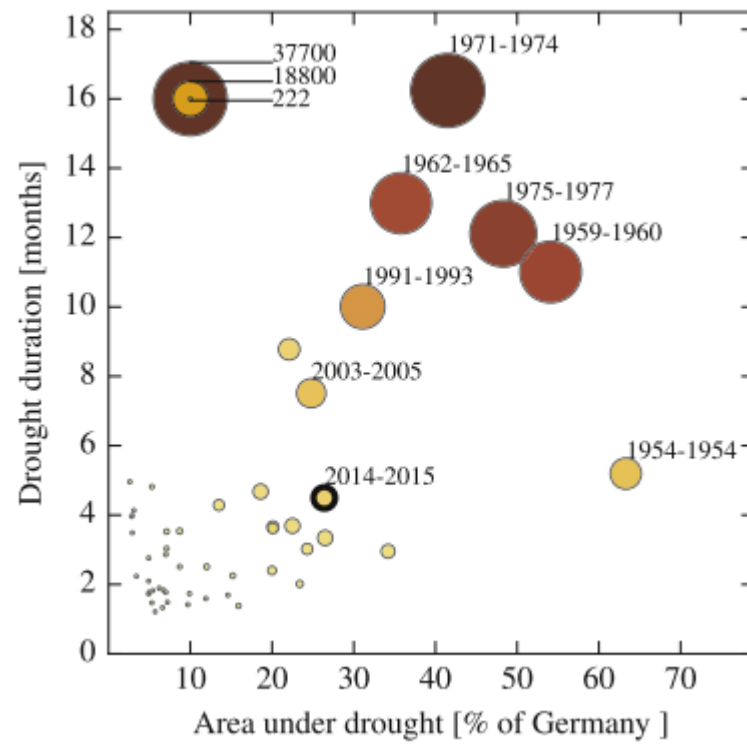


Abbildung 38: Bewertung der Schwere von Dürreereignissen anhand von Flächenausdehnung, Länge und Intensität der Dürreereignisse laut SMI mit Referenzperiode vom 01/1954 bis 10/2015 von Zink et al. (2016).

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum

Unterschrift