Eva Paton, Johannes Vogel, Björn Kluge & Thomas Nehls

Ausmaß, Trend und Extrema von Dürren im urbanen Raum

Extent, trend and extremes of droughts in urban areas

In der derzeitigen Wahrnehmung werden die Sommer dürrer, heißer und extremer – dieser Eindruck verstärkt sich im urbanen Raum durch das Auftreten von Hitzeinseleffekten in dicht bebauten Gebieten. Um das wirkliche Ausmaß der Dürre bewerten zu können, wurden Zeitreihendaten von 31 urbanen Klimastationen (DWD) für den Zeitraum 1950 bis 2019 mittels des standardisierten Niederschlagsindex (SPI) bezüglich Dürrelängen, Dürreextrema, Hitzewellen und gleichzeitig auftretenden Hitze- und Dürremonaten ausgewertet. Die Analyse zeigt eine große Heterogenität innerhalb von Deutschland: In den meisten Städten trat 2018 eine lange Dürre von einer durchschnittlichen Dauer von 6 Monaten auf, gleichzeitig gehörte das Jahr 2018 nur bei einem Drittel der Städte zu den drei Jahren mit den längsten Dürren seit 1950. Bei den meisten betrachteten Stationen traten die längsten Dürren in den Jahren 1953, 1971 und 1976 auf. Bei einigen südlichen und mitteldeutschen Städten kann man eine statistisch signifikante Zunahme der Anzahl der Dürremonate pro Dekade seit 1950 verzeichnen. Andere Städte, eher im Norden und Nordwesten gelegen, zeigen nur in den letzten zwei Dekaden eine Zunahme oder gar keinen Trend. Die Compoundanalyse von gleichzeitig auftretenden Hitze- und Dürremonaten zeigt bei den meisten Stationen eine starke Zunahme innerhalb der letzten zwei Dekaden, wobei die beiden Komponenten regional mit einem sehr unterschiedlichen Anteil zur Zunahme der Compoundereignisse beitragen.

Schlagwörter: meteorologische Dürren, Hitzewellen, Compoundereignisse, standardisierter Niederschlagsindex (SPI), urbane Hydrologie

Summers are currently perceived to be getting longer, hotter and more extreme – and this impression is reinforced in urban areas by the occurrence of heat island effects in densely built-up areas. To assess the real extent of increasing drought occurrences in German cities, a DWD data set of 31 urban climate stations for the period 1950 to 2019 was analysed using the standardised precipitation index (SPI) with regard to meteorological drought lengths, drought extrema, heat waves and compound events in the form of simultaneously occurring heat waves and drought months. The analysis shows a large degree of heterogeneity within Germany: a severe drought occurred in most cities in 2018, while the year 2018 was among the three years with the longest droughts (since 1950) for only one third of the cities. Some southern and central German cities show a statistically significant increase in drought months per decade since 1950, other cities, mostly in the north and northwest, only show an increase in the past two decades or even no trend at all. The compound analysis of simultaneously occurring heat and drought months shows a strong increase at most stations in the last two decades, whereby the two components are responsible with a very different proportion regionally for the increase in compound events.

Keywords: meteorological droughts, heat waves, compound events, standardised precipitation index (SPI), urban hydrology

1 Einleitung

Als "Dürre" werden Zeiträume mit signifikant verringerter Wasserverfügbarkeit bezeichnet, in welchen es zu erheblichen negativen Auswirkungen auf Vegetation, landwirtschaftliche Produktion sowie zu reduzierten Abflüssen in Gewässern, verringerten Grundwasserneubildungsraten und Problemen in der Wasserversorgung kommen kann (TATE & GUSTARD, 2000). Dementsprechend werden meteorologische Dürren (Perioden mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen), hydrologische Dürren (Perioden mit unterdurchschnittlichen Abflüssen in Oberflächengewässern) und landwirtschaftliche Dürren (innerhalb der Vegetationsperiode auftretende Perioden mit unterdurchschnittlicher Bodenwasserverfügbarkeit in Agrargebieten bei gleichzeitigen hohen Verdunstungswerten, woraus sich Ernteeinbußen ergeben) unterschieden (WILHITE & GLANTZ, 1985; MISHRA & SINGH, 2010).

Der Schwerpunkt dieser Studie liegt auf der Untersuchung von Dürredynamiken im städtischen Raum, um Auswirkungen von Dürrephasen auf den urbanen Bodenwasserhaushalt und auf den Zustand des urbanen Grüns besser abschätzen zu können und um den zuständigen Wasserverbänden, Umwelt- und Grünflächenämtern eine Grundlage für eine quantitative, regional vergleichbare Dürreberechnung als Entscheidungshilfe für notwendige Anpassungsmaßnahmen zu geben.

Eine spezielle Definition für die urbane Dürre gibt es noch nicht. Sie könnte ähnlich wie die landwirtschaftliche Dürre definiert werden: Wir definieren hier die urbanen Dürren als Perioden mit unterdurchschnittlicher Bodenwasserverfügbarkeit und/oder Grundwasserneubildung bezogen auf die vielfältigen Versorgungsansprüche in urbanen Gebieten. Dazu gehören z. B. die Trinkwasserversorgung in den städtischen Bundesländern Berlin, Hamburg und Bremen (Wasserhaushaltsgesetz verbietet Importe aus anderen Bundesländern) sowie der Mindestwasserbedarf urbanen Grüns ohne dauerhafte Schädigung (STRATOPOULOS et al., 2019). Urbanes Grün umfasst hierbei Parkanlagen, Straßenbäume und blaugrüne Infrastrukturen wie Gründächer oder Mulden-Rigolen-Systeme (GOLDEN & HOGHOOGHI, 2018), wobei letztere vermehrt in Städten eingesetzt werden, um als Klimaanpassungsmaßnahmen Hitze und Starkregenereignisse zu puffern, und bei denen es wichtig ist, dass sie auch in Dürreperioden ihre Funktionalität beibehalten.

Die Untersuchung von urbanen Dürren sollte im Idealfall durch die Analyse von gemessenen urbanen Bodenfeuchtedatenzeitreihen erfolgen. Diese sind jedoch, mit der bemerkenswerten

Ausnahme der Studie von SCHAFFITEL et al. (2019) im urbanen Raum im Allgemeinen nicht verfügbar. SCHAFFITEL et al. quantifizierten für 22 Standorte in Freiburg, davon vier auf städtischen Grünflächen, die Bodenfeuchte auf drei verschiedenen Tiefen; ihr zweijähriger Messzeitraum lässt jedoch keine Rückschlüsse über längerfristige Veränderungen zu.

GUERREIRO et al. (2018) untersuchten für 571 europäische Städte das zukünftige Auftreten von Dürren mithilfe von Klimaprojektionen (Emissionsszenario RCP 8.5) und sahen für das drastischste Klimawandelszenario für alle untersuchten deutschen Städte eine Zunahme des Dürrerisikos für den Zeitraum 2051 bis 2100. Langzeitstudien über die derzeitigen und vergangenen Dürredynamiken für Deutschland liegen nur für den nicht urbanen Raum vor. LÜTTGER & FEIKE (2018) fanden eine statistisch signifikante Zunahme der Anzahl aufeinanderfolgender Tage ohne Niederschlag innerhalb des Zeitraumes 1900 bis 2010 für die Sommerhalbjahre. REINERMANN et al. (2019) untersuchten den Einfluss von Dürren auf den bundesweiten Vegetationszustand anhand von aus Fernerkundungsdaten (MODIS) abgeleiteten Vegetationsindizes für den Zeitraum 2000 bis 2018. Hier wurden insbesondere die Effekte der starken Dürren der Jahre 2003 und 2018 untersucht und eine starke räumliche Heterogenität bezüglich der Ausprägung von unterschiedlichen Dürrejahren nachgewiesen; eine gleichzeitige räumliche Analyse des Niederschlagsregimes wurde jedoch nicht vorgenommen.

Ein zeitlich hochaufgelöster Datensatz wird im Dürremonitor Deutschland des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ modelliert, wo für das Jahr 1951 bis heute täglich flächendeckende Daten zum Bodenfeuchtezustand mit einer räumlichen Auflösung von 4 x 4 km² bereitgestellt werden (ZINK et al., 2016). Eine direkte Übertragbarkeit der Methodik und dieses Datensatzes auf den urbanen Raum wird hier jedoch aufgrund der großen Heterogenität von urbanen Böden in Frage gestellt.

Die negativen Effekte von Dürren auf die Vegetation werden verstärkt durch das gleichzeitige oder hintereinandergeschaltete Auftreten von Dürren und Hitzewellen (CIAIS et al., 2005; REICHSTEIN et al., 2007; DE BOECK et al., 2016); diese Ereignisse werden auch als sogenannte Compoundereignisse bezeichnet (ZSCHEISCHLER et al., 2018). Durch extrem hohe Temperaturen und Evapotranspirationsraten kommt es zu einer beschleunigten Reduzierung der Wasserverfügbarkeit in der oberen Bodenzone; gleichzeitig schädigen sowohl Wassermangel als auch extreme Hitze die urbane Vegetation direkt oder indirekt durch ein vergrößertes Risiko an Schädlingsbefall (DALE & FRANK, 2017). Eine Reihe an Studien zeigte, dass Hitzewellen sowohl global (PERKINS et al., 2012) als auch regional (FENNER et al., 2019; TOMCZYK & BEDNORZ, 2016; DELLA-MARTA et al., 2007) zunehmen. Im urbanen Raum sind diese stärker ausgeprägt durch den Hitzeinsel-Effekt, welcher zu generell erhöhten Temperaturen im Vergleich zum unbebauten Umland führt (LI et al., 2015). Die europaweiten Analysen von MANNING et al. (2019) haben gezeigt, dass Compoundereignisse in der Form von langen, gleichzeitig niederschlagsfreien und heißen Perioden im Hochsommer seit 1950 zugenommen haben, wobei hier hauptsächlich die Temperatur als Antrieb genannt wurde. Die Compoundereignisse werden dabei generell wärmer, ihre Dauer steigt aber nicht (MANNING et al., 2019). Eine umfassende Analyse zu dem Auftreten von Compoundereignissen ist jedoch für urbane Zentren in Deutschland bisher nicht erfolgt.

Da Langzeitmessungen von Bodenfeuchten urbaner Gebiete nicht zur Verfügung stehen, werden in dieser Studie als erste Abschätzung dafür Ausmaße, Extreme und Trends meteorologischer Dürren in Städten untersucht. Es wurden dabei die folgenden zwei Leitfragen beantwortet: War der Sommer 2018 im Vergleich klimatischer Zeitreihen wirklich so extrem trocken wie allgemein angenommen? Hierfür schauen wir uns die letzten drei Jahre im Detail an, da 2017 als außergewöhnlich feucht, 2018 als extrem trocken und 2019 mit gleich 2 Hitzewellenperioden und Rekordtemperaturen im Sommer als besonders heiß gilt. Gleichzeitig untersuchen wir das Trendverhalten über längere Perioden: nehmen Dürren (bezogen auf die Sommermonate und auf das ganze Jahr), Hitzewellen und Compoundereignisse seit den1950ern zu, und wenn ja, in welchen Regionen ist die Zunahme besonders ausgeprägt?

Dafür wurde für 31 Städte für den Zeitraum 1950 bis 2019 untersucht:

(1) das aktuelle Ausmaß von Dürren: Wie viele Dürremonate gab es in den Sommermonaten (April bis September) bzw. im ganzen Jahr in den letzten drei Jahren (2017 bis 2019)? Gibt es dabei regionale Unterschiede?

(2) die längsten Dürren seit 1950: In welchen Jahren traten die drei längsten Dürren (sowohl bezogen auf die Sommermonate als auch auf das gesamte Jahr) auf und wie lang dauerten sie an?

(3) das Langzeitverhalten mit Trendanalyse: Wie variieren niederschlagsarme und reiche Perioden innerhalb der letzten sieben Dekaden? Wie verändert sich die Anzahl von Dürremonaten innerhalb der letzten sieben Dekaden?

(4) das Auftreten von Compoundereignissen: Wie verändert sich die Anzahl von Dürremonaten mit gleichzeitig in diesem Monat auftretenden Hitzewellen im Untersuchungszeitraum?

2 Methoden

2.1 Dürreberechnung

Die Anzahl von Dürremonaten wurde mithilfe des standardisierten Niederschlagsindex SPI (Standardised Precipitation Index) nach MC KEE et al. (1993) berechnet. Der SPI ist einer der gebräuchlichsten Dürreindizes zur Abschätzung von Niederschlagsabweichungen. Für jeden einzelnen Monat wird eine Gammaverteilung an die Verteilung der monatlichen Niederschlagswerte aus Langzeitdatensätzen angepasst und diese dann in eine Standard-Normalverteilung transformiert. Ein negativer SPI-Wert zeigt einen Zeitraum, der trockener war als normal, ein positiver SPI-Wert zeigt einen Zeitraum, der feuchter war als normal und ein SPI-Wert um die Null steht für einen Zeitraum mit durchschnittlichem Niederschlag.

Abbildung 1 zeigt ein Berechnungsbeispiel für den Monat Juni: eine 70-jährige Zeitreihe mit Monatssummen der Niederschläge für den Monat Juni wird als Verteilungsfunktion (schwarzes Balkendiagramm) bzw. als kumulierte Häufigkeitsverteilung dargestellt. Der kumulierten Häufigkeitsverteilung wird eine Gammaverteilung angepasst (pinke Linie) und diese in eine (0,1)-Normalverteilung transformiert. Damit kann für jeden mo-

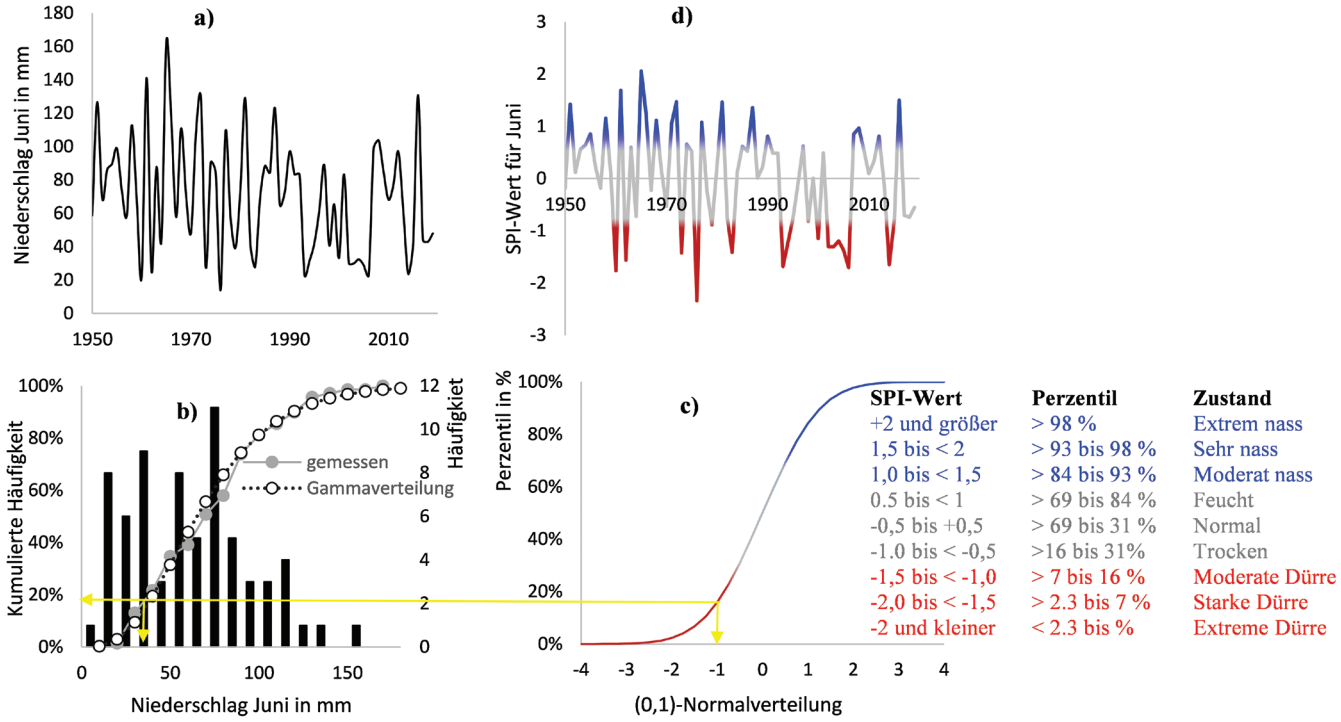

Abbildung 1
Transformation der Zeitreihe monatlicher Niederschlagssummen in eine SPI-Zeitreihe am Beispiel Juni: a) jährliche Zeitreihe des Niederschlags im Monat Juni, b) Häufigkeitsverteilung der monatlichen Niederschlagssummen (schwarzes Balkendiagramm), kumulierte Häufigkeitsverteilung der Niederschlagssummen und daran angepasste Gammaverteilung, c) Transformation der angepassten Gammaverteilung in eine (0,1)-Normalverteilung und zugehörige Werte für SPI, Perzentil und Zustand nach MC KEE et al. (1993) und d) Darstellung des SPI-Verlaufs als jährliche Zeitreihe für den Monat Juni (rot: zu trocken, blau: zu nass). Die gelben Pfeile erläutern das Berechnungsbeispiel im Text.
Conversion of monthly precipitation on the example of June into an SPI time series: a) annual time series of precipitation depths for the month June, b) frequency distribution of this precipitation depths (black bar graph), cumulative precipitation probability and fitted gamma distribution, c) transformation of the fitted gamma distribution to a (0,1) normal distribution and corresponding values for SPI, percentile and condition after MC KEE et al. 1993 and d) SPI time series for the month June (red: too dry, blue: too wet). The yellow arrows explain the calculation example in the text.

natlichen Niederschlagswert ein SPI-Wert abgeleitet werden, der beschreibt, ob ein gegebener Monatsniederschlag eher im unteren, trockenen (roten) Bereich oder im oberen, feuchten (blauen) Bereich liegt. Bei SPI-Werten kleiner als -1 spricht man nach der Einleitung von MC KEE et al. (1993) von einer Dürre.

Eine Dürrephase von mehreren Monaten beginnt, wenn der SPI-Index bei mindestens zwei hintereinander folgenden Monaten kleiner als -1 ist und sie endet, wenn das Feuchtigkeitsregime wieder im Normalbereich ist bzw. der SPI-Index größer null wird (MISHA & SINGH, 2010; GANGULI & GANGULY, 2016).

Für die Berechnung des SPI-Wertes wurde die Software R 3.6.2 (R Core Team, 2018) und die R Cran Routine *spi* des SPEI-Pakets (VICENTE-SERRANO et al., 2010) verwendet. Für die Berechnung zusammenhängender Dürrephasen wurde eine Routine in R 3.6.2 programmiert. Die Trendanalysen wurden mit dem Mann-Kendall-Test mit der Routine *mannKen* des Kendall-Pakets (nach HIPEL & MC LEOD, 2005) durchgeführt (statistisch signifikanter Trend mit p-Wert von 0.05).

Bei der Analyse der Dürrephasen wurde unterschieden in Jahresdürren, welche über das ganze Jahr hinweg auftreten, und sogenannten Sommerdürren, für welche nur die Niederschlagsdefizite in der Vegetationsperiode von April bis September betrachtet wurden.

2.2 Identifikation von Hitzewellen und Compoundereignissen

Es gibt eine Vielzahl von Definitionen von Hitzewellen (siehe FENNER et al., 2018 für einen umfassenden Vergleich) und Wärmeperioden, wobei die meisten einen statischen Schwellenwert und/oder das Überschreiten eines bestimmten Perzentils zur Identifikation eines Hitzetages benutzen. In dieser Studie sollen die Hitze-Dürre-Compoundereignisse von echten Hitzetagen im Hochsommer im Vordergrund stehen, welche einen besonders negativen Einfluss auf den Zustand des urbanen Grüns haben können. Daher wurden in dieser Studie nur die Hitzewellen mit außergewöhnlich hohen Temperaturen betrachtet: Hitzewellen sind hier eine Folge von mindestens drei Tagen, an welchen die Tagesmaximumtemperatur den 90. Perzentilwert überschreitet (bezogen auf ein Zeitfenster von 14 Tagen vor und nach jedem Kalendertag über die gesamte Untersuchungsperiode) und größer als 30 °C ist. Zur Perzentilberechnung wurde die R Routine *ts2clm* des heatwaveR-Pakets benutzt. Für jeden Monat wurde die Anzahl von Hitzewellentagen pro Monat berechnet (nicht die Anzahl der Hitzewellen). Ein Compoundereignis tritt auf, wenn in einem Monat sowohl eine Dürre vorlag als auch mindestens eine Hitzewelle von 3 Tagen registriert wurde.

2.3 Datenquellen

Die Analyse basiert auf Klimazeitreihen für 31 über das gesamte Bundesgebiet verteilte städtische Stationen aus dem DWD

Abbildung 2
Lage der untersuchten Städte in Deutschland.
Location of investigated towns in Germany.

Climate Data Center (DWD, 2018). Die Auswahlkriterien umfassten die urbane Lage der Stationen (keine Dörfer oder Stationen in rein ländlichem Raum, Einwohnerzahl größer 50.000, in der Mehrzahl über 100.000 Einwohner, außer die beiden kleineren Städte Angermünde und Hofheim), 70 Jahre kontinuierliche Daten für monatlichen Niederschlag und tägliche Maximaltemperatur sowie ein Minimum an Datenlücken (< 1 % des Datensatzes). Insgesamt waren im DWD-Datensatz nur 31 Stationen in unterschiedlichen Städten mit kontinuierlichen, monatlichen Niederschlagsdaten über den langen Zeitraum verfügbar, davon existierten für 22 Stationen kontinuierliche Zeitreihen mit Maximaltemperaturen (Abb. 2). Tabelle 1 enthält zusätzlich die DWD-Stationsnummer und die urbane Klimazone nach STEWART & OKE (2012). Bei einigen Stationen waren Daten erst ab dem Jahr 1960 verfügbar. Zeitreihen im urbanen Raum von Mecklenburg-Vorpommern und Teilen von Brandenburg und Bayern wiesen große Lücken auf, weswegen sie von der Untersuchung ausgeschlossen wurden.

Eine Mann-Kendall-Trendanalyse von Jahres- und Sommerniederschlag (April bis September) ergab, bis auf wenige Ausnahmen, kein statistisch signifikantes Trendverhalten. Da es zu dieser Thematik bereits viele Untersuchungen gibt, wird im weiteren Artikel auf diese Thematik nicht eingegangen (z. B. detailliert in der Studie nach GÄDEKE et al. (2017), in welcher die Autoren zwar eine Tendenz zu Abnahmen von Niederschlagsstationen im Osten Deutschlands fanden, aber ebenfalls keine statistische Signifikanz nachweisen konnten).

Tabelle 1
Übersicht über die benutzten DWD-Klimastationen einschließlich Stationsname, DWD-ID, Anfangsjahr (1950 oder 1960) und Einordnung der lokalen urbanen Klimazone nach STEWART & OKE (2012).
Overview of the considered DWD climate stations including station name, DWD ID, start year (1950 or 1960) and classification of local climate zone according to STEWART & OKE (2012).

DWD Stationsname	DWD ID	Anfangsjahr	Kategorie
Angermünde	164	1960*	offen, Flachbau
Aschaffenburg	202	1950	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Augsburg	232	1950*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Baden-Baden-G.	257	1950	offen, Flachbau
Bamberg	282	1950	offen, mittlere Gebäudehöhe
Berlin-Tempelhof	433	1950*	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Bielefeld-Senne.	488	1950	urban
Bremen	691	1950	offen, mittlere Gebäudehöhe
Chemnitz	853	1950*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Cottbus	880	1950*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Cuxhaven	891	1950*	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Dresden-K.	1048	1960*	offen, Flachbau
Erfurt-Weimar	1270	1960*	offen, Flachbau
Essen-Bredeney	1303	1950*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Frankfurt/Main	1420	1950*	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Freiburg	1443	1950*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Garmisch-Part.	1550	1950	offen, mittlere Gebäudehöhe
Gelskirchen-B.	1595	1950	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Gera-Leumnitz	1612	1960*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Görlitz	1684	1950*	offen, Flachbau
Göttingen	1691	1950*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Hamburg-Fuhls.	1975	1950*	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Hannover	2014	1950*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Hofheim	2268	1960	offen, Flachbau
Kempten	2559	1960	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Köln-Bonn	2667	1960*	offen, mittlere Gebäudehöhe
Konstanz	2712	1950	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Magdeburg	3126	1950*	offen, mittlere Gebäudehöhe
München-Stadt	3379	1960	kompakt, mittlere bis hohe Gebäudehöhe
Hude/Oldenburg	2355	1950	offen, mittlere Gebäudehöhe
Saarbrücken-Ens.	4336	1960	offen, mittlere Gebäudehöhe

* Tägliche Temperaturzeitreihen für Compoundanalyse verfügbar.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ausmaß der Dürren 2017, 2018 und 2019

Innerhalb der Jahre 2017 bis 2019 sind hinsichtlich der Dürrephasen drei unterschiedliche Ausprägungen erkennbar (Abb. 3 a).

Im Jahr 2017 gab es außer drei kürzeren Dürren an den nordrhein-westfälischen Stationen keine Dürrephasen in den untersuchten Städten. Im Jahr 2018 gab es bei allen Stationen, außer München, langanhaltende Dürren von 3 bis 10 Monaten mit einer durchschnittlichen Dauer von 6 Monaten. Das Jahr 2019 zeigt starke Unterschiede: An 18 von 31 Stationen treten keine Dürrephasen auf, die restlichen Stationen, alle eher im mittleren Bereich von Deutschland gelegen, zeigen Dürren von 2 bis 7 Monaten mit einer durchschnittlichen Dauer von 3,5 Monaten.

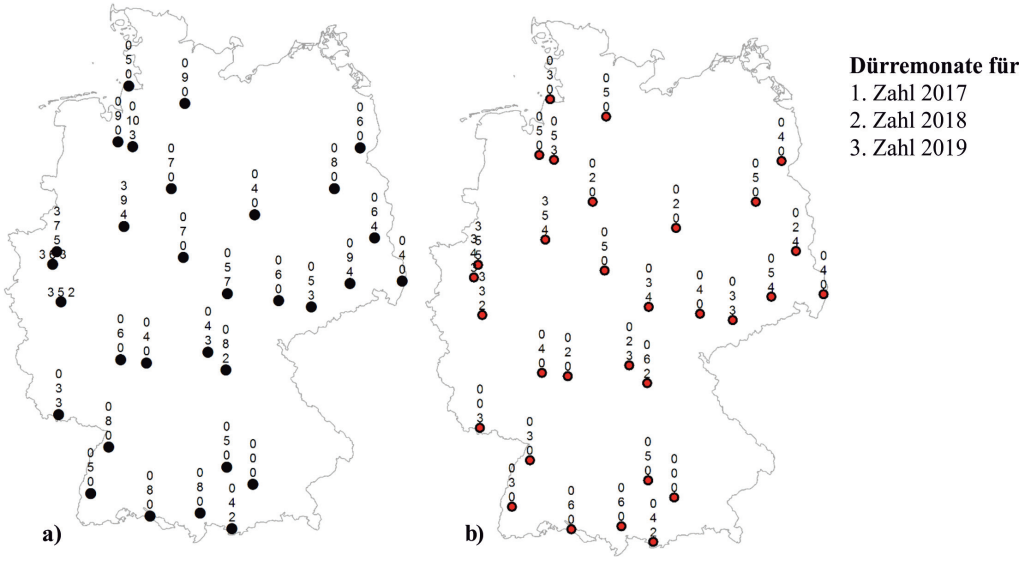

Abbildung 3
Anzahl der aufeinanderfolgenden Dürremonate (SPI-Wert < -1) für die Jahre 2017, 2018 und 2019 für 31 städtische Stationen: a) innerhalb des ganzen Jahres (Jahresdürren), b) innerhalb der Monate April bis September (Sommerdürren).
Number of consecutive drought months (SPI values < -1) for the years 2017, 2018 and 2019 for 31 urban stations: a) within the entire year (annual drought periods), b) within the months April to September (summer drought periods).

Die Dürrephasen im Jahr 2018 waren sowohl auf die Sommermonate (April bis September, im Durchschnitt 61 % der Dürremonate) als auch auf die Wintermonate des Jahres (39 %) verteilt. Die Dürrephasen im Jahr 2019 lagen mit einer Ausnahme (Erfurt-W.) alle innerhalb der Sommermonate (Abb. 3 b).

3.2 Die längsten Dürren

Die über den gesamten Untersuchungszeitraum von 70 Jahren mit 16 Monaten längsten Dürrephasen traten in Bielefeld (im Jahr 1963) und Baden-Baden (1953) auf, gefolgt von Hamburg und Gelsenkirchen (14 Monate, beide in 1958) und Bremen, Essen, Frankfurt, Göttingen, Hofheim und München (13 Monate, in den 1950er bis 1970er Jahren) (Abb. 4). Dürren, die länger als 12 Monate dauern, setzen sich ohne Unterbrechung ins nächste Jahr fort. Die über alle Stationen gemittelte Dauer der längsten Dürre bzw. der drei längsten Dürren beträgt 11 bzw. 9 Monate.

Die unter Kapitel 3.1 ermittelte mittlere Dürredauer für das Jahr 2018 von 6 Monaten ist demnach weniger als halb so groß wie in den in Abbildung 4 dargestellten Extremjahren.

Die Jahre, in welchen bei den meisten Stationen extrem lange Dürren auftraten, wie dargestellt in Abbildung 4, sind: 1976 (14 von 31 Stationen, 9 Monate), 1953 und 1971 (11 Stationen, 10 und 9 Monate), 2003

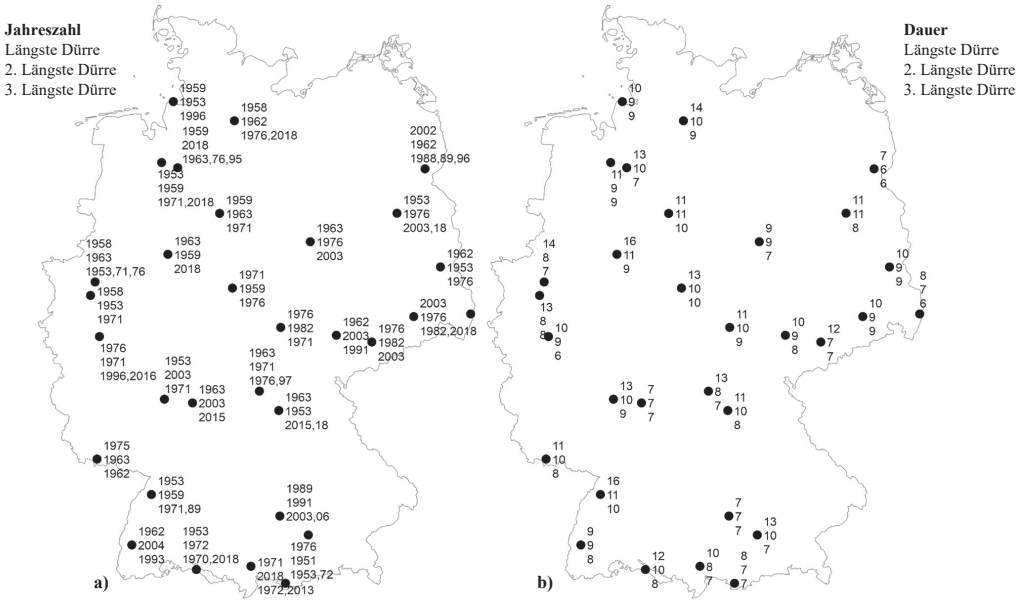

Abbildung 4
Jahre mit extrem langen Dürren und zugehörigen Dauern in Monaten innerhalb des Zeitraumes von 1950 bis 2019 für 31 städtische Stationen: a) Jahreszahl der Dürren, wobei die Jahreszahl das Anfangsjahr der jeweiligen Dürrephase angibt; b) Länge der Dürren in Monaten (es sind die drei längsten Dürren dargestellt, welche in dem Zeitraum auftraten; bei gleicher Dürredauer wurden alle zugehörigen Jahre gelistet).
Years with the three longest droughts and corresponding lengths in months within the time period 1950 to 2019 for 31 urban stations: a) year of drought, where the year represents the year in which the corresponding drought phase started, b) length of the droughts in month (the three longest drought periods are depicted; if there were years with the same drought length, all years are listed).

(10 Stationen, 8 Monaten), 1963 und 2018 (9 Stationen, 10 und 9 Monate).

Nach dieser Analyse gehörten die Jahre 2018 und auch das ebenfalls als sehr trocken in Erinnerung gebliebene Jahr 2003 nur bei einem Drittel der Stationen zu den Extremjahren. Bei der Mehrheit der Stationen zeigen sich jedoch andere Häufungen von längeren Dürrephasen, zeitlich verteilt über die 1950er, 60er und 70er Jahre.

3.3 Langzeitverhalten von niederschlagsarmen Perioden und Trendanalyse von Dürren

Niederschlagsreiche, Normal- und Dürreperioden wechseln sich über 70 Jahre hinweg ständig ab, wie dargestellt in Abbildung 5 mit einer Nord-Süd-Sortierung aller untersuchten Städte für alle Monate (Abb. 5a) und nur für die Sommermonate (Abb. 5b). In beiden Darstellungen kann man Jahresabschnitte mit länger anhaltenden Dürreperioden erkennen. Bezogen auf konsekutive Abschnitte mit trockenen Monaten im gesamten Jahresverlauf zeigt sich für fast alle Städte ein Dürremaximum mit längeren Dürrephasen in den 1960ern und 1970ern, wohingegen die letzten 20 Jahre bezüglich nassen Phasen und bezüglich Dürren eher heterogen sind (Abb. 5a).

Hinsichtlich konsekutiver Sommerdürren (ungeachtet der Niederschlagsbedingungen in den dazwischenliegenden Winterphasen) sieht man deutliche Häufungen in der Mitte der 1970er, am Anfang der 1990er und in den späten 2010er Jahren (jedoch weniger ausgeprägt in den südlichen Regionen). Es treten dabei jeweils 2 bis 5 Jahre lang aufeinanderfolgende Sommer mit Dürren auf (Abb. 5b).

Um eine mögliche Änderung des Auftretens von Dürrephasen quantitativ besser abschätzen zu können, wurde die Anzahl von Dürremonaten (sowohl für die Jahresdürren als auch für die Sommerdürren) für 10-Jahresabschnitte gemittelt und auf Trends hin untersucht (Abb. 6). Sechs unterschiedliche Dynamiken lassen sich ableiten: in Bezug auf die Jahresdürren gibt es viele Städte, die keine Veränderungen zeigen (Abb. 6a), drei Städte mit nach Mann-Kendall-Test statistisch nicht signifikanten Abnahmen (Abb. 6b) und vier mit nicht signifikanten Zunahmen (Abb. 6c). In Bezug auf die Sommerdürren zeigt sich bei der Hälfte der Städte keine Veränderung (Abb. 6d), bei einer Reihe von Städten ist ein besonders großer Anstieg in den zwei letzten Jahrzehnten zu beobachten (Abb. 6e), bei acht Städten lässt sich ein zum Teil statistisch signifikanter Anstieg (Abb. 6f) erkennen (signifikant für die Städte Freiburg p = 0,04, Bamberg p = 0,05 und Dresden p = 0,05). Abbildung 7 fasst die Trends der Dekaden mit Sommerdürren für die untersuchten Städte räumlich zusammen: Eine klar differenzierbare, regionale Ausprägung ist nicht erkennbar; im Gegenteil, die Städte mit zunehmenden Sommerdürren sind über das gesamte Bundesgebiet verteilt.

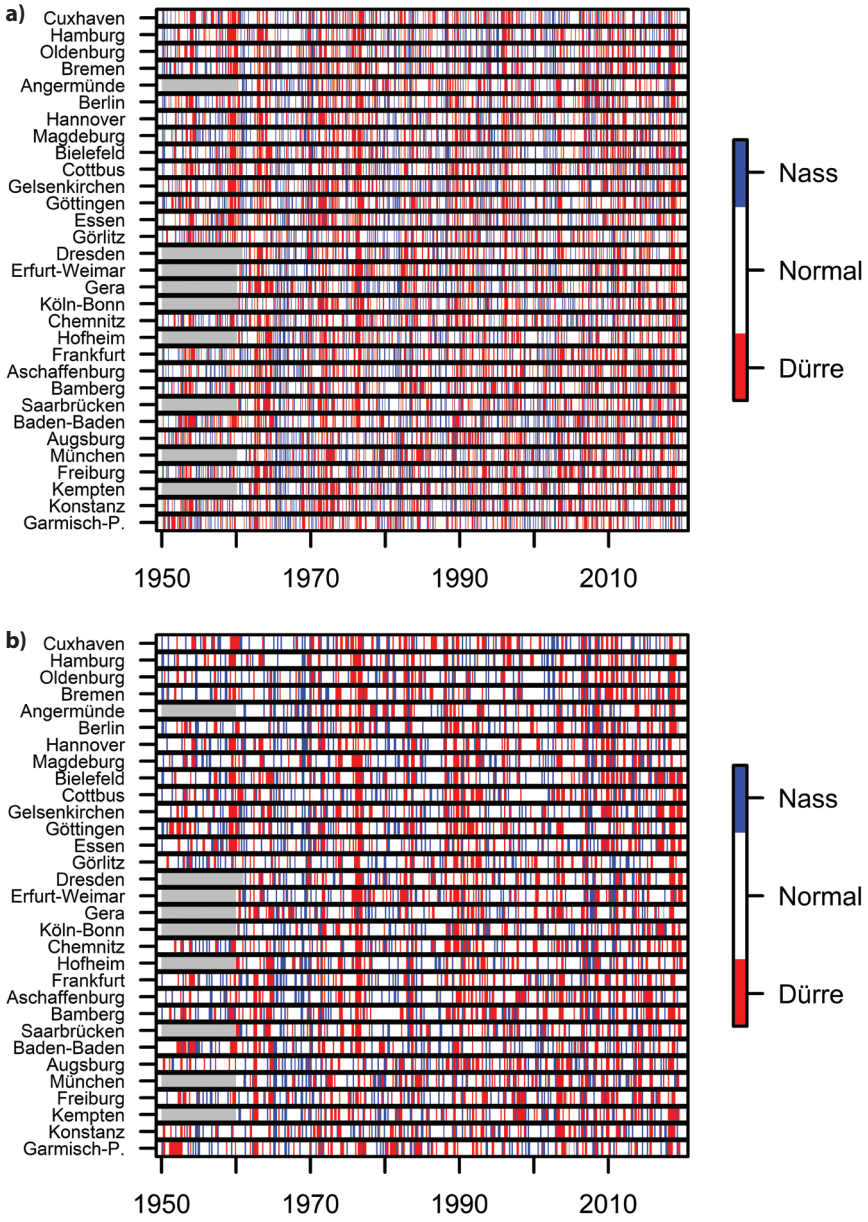

Abbildung 5
Visualisierung des Langzeitverhaltens (in Monatsauflösung) von niederschlagsreichen Perioden (SPI > 1, blau) und Dürrephasen (SPI < -1, rot) und sogenannten Normalphasen (-1 ≤ SPI ≤ 1, Details zur Farbskalierung siehe Abbildung 1c) für den Zeitraum von 1950 bis 2019: a) für alle Monate im Jahr; b) nur für die Sommermonate April bis September. Grau: Datenlücken. Die Städte sind von Nord nach Süd sortiert.
Visualisation of the long-term behaviour (in monthly resolution) of periods with above-normal precipitation (SPI > 1, blue) and drought phases (SPI< -1, red) for the time period 1950 to 2019 and normal periods ((-1 ≤ SPI ≤ 1, details for colour coding see Figure 1c): a) for all months, b) only for the summer months April-September. Grey: data gaps. Towns are sorted from north to south.

3.4 Compoundanalyse: gleichzeitiges Auftreten von Dürremonaten und Hitzewellen

Für die Trenduntersuchung von Hitzewellen und den sich daraus ergebenden Compoundereignissen sind nur für 22 der 31 Stati-

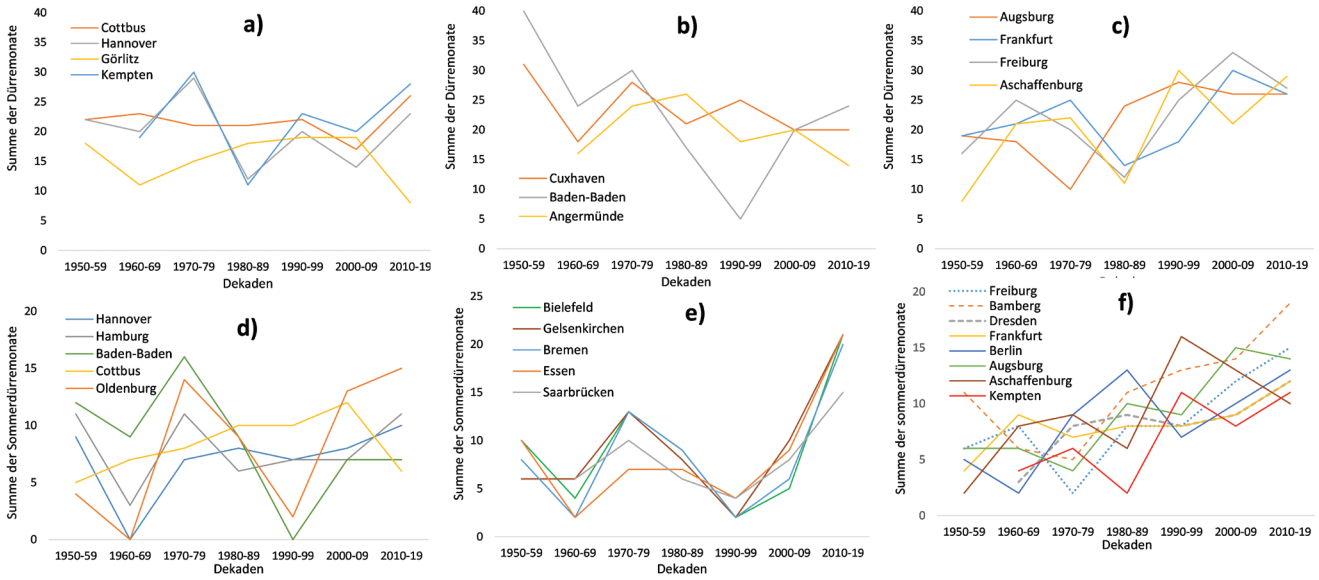

Abbildung 6
Veränderung der Anzahl von Dürremonaten pro Dekade von 1950 bis 2019 für Jahresdürren: a) kein Trend erkennbar, b) nicht-signifikante Abnahme, c) nicht-signifikante Zunahme; und für Sommerdürren: d) kein Trend erkennbar, e) aktuelle Zunahme erkennbar in den letzten zwei Dekaden und f) signifikante (gestrichelt) und nicht-signifikante Zunahme erkennbar über gesamten Zeitraum.
Change in the number of drought month per decade for 1950 to 2019 for annual drought periods: a) no trend detectable, b) non-significant decrease, c) non-significant increase; and for the summer drought periods: d) no trend detectable, e) current increase detectable in the last two decades and f) significant (dashed line) and non-significant increase detectable over entire time period.

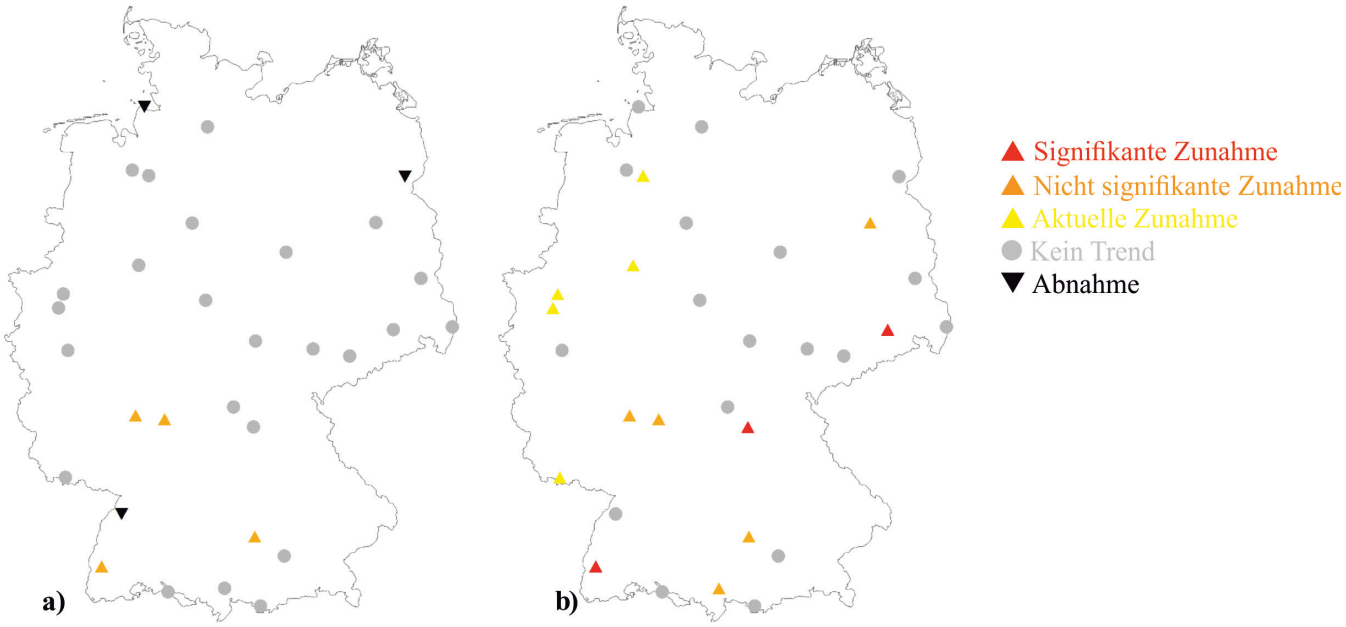

Abbildung 7
Räumliche Darstellung der Trends bezüglich der Anzahl von Dürremonaten pro Dekade von 1950 bis 2019 für a) Jahresdürren und b) Sommerdürren in 31 deutschen Städten.
Map representation of trends regarding the number of drought months per decade for 1950 to 2019 for a) annual droughts and b) summer droughts in 31 towns.

onen tägliche Temperaturmessungen für den gesamten Untersuchungszeitraum verfügbar. Bei allen 22 untersuchten Städten hat die Anzahl der Hitzewellentage in den letzten ein bis zwei Dekaden zugenommen (mit Ausnahme von Cuxhaven). Die zeitlichen und räumlichen Variationen der Zunahme sind in Abbildung 8 dargestellt: Seit den 1950ern und 60er Jahren hat sich die Anzahl der Hitzewellentage pro Dekade verdoppelt oder sogar vervielfacht; z. B. für Frankfurt von etwa 20 Hitzewelletagen in den 1950ern auf über 80 in den 2010ern. Der Anstieg ist gerade für die letzten zwei Jahrzehnte (Sprung von orangene auf rote

Linie) sehr ausgeprägt und für die Hälfte der Stationen statistisch signifikant (siehe Kennzeichnung in Abbildung 8, p-Werte variieren zwischen 0,003 und 0,05).

Compoundereignisse, also das gleichzeitige Auftreten eines Dürremonats und einer Hitzewelle, haben in der letzten Dekade, im Vergleich zu den Jahrzehnten davor, sprunghaft zugenommen (Abb. 9, davon statistisch signifikant Cottbus, Görlitz und Freiburg mit $p < 0{,}02$). Die größte Zunahme ist für Magdeburg verzeichnet: Hier stieg die Anzahl von Compoundereignissen von unter 2 in den 1950er Jahren auf 10 in den 2010ern. In anderen Städten war der Anstieg nicht ganz so groß, jedoch ist bei den meisten Städten mindestens eine Verdopplung, eher eine Verdreifachung der Anzahl der Compoundereignisse für den gleichen Zeitraum festzustellen. Keine Zunahme über den gesamten Zeitraum gab es nur für die Stadt Cuxhaven.

Eine Zunahme von Compoundereignissen lässt sich auf die Zunahme von gleichzeitig stattfindenden Hitzewellen oder Dürren oder einer Kombination der beiden zurückführen. Für Cottbus wurde z. B. kein Anstieg von Dürren über den gesamten Zeitraum festgestellt, dafür dominiert hier die Zunahme der Hitzewellen. Für Freiburg wurde eine statistisch signifikante Zunahme von Dürren und eine Zunahme von Hitzewellen beobachtet. Hier zeigt sich darüber hinaus, dass diese zum gleichen Zeitpunkt auftreten und in ihrer Kombination eine statistisch signifikante Zunahme von Compoundereignissen zu verzeichnen ist.

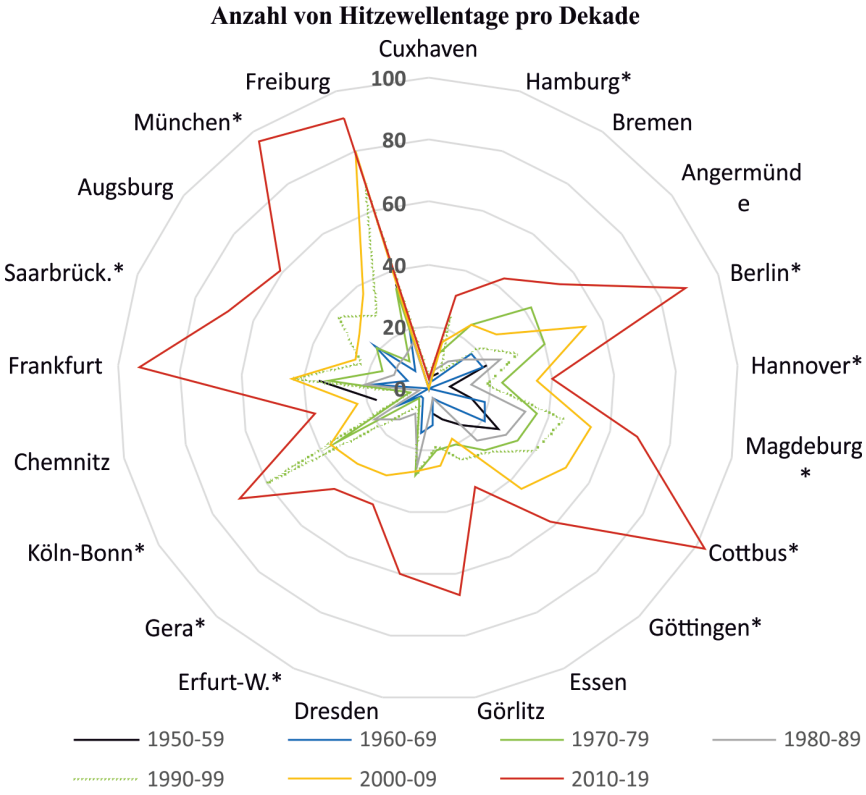

Abbildung 8
Netzdiagramm mit der Anzahl der Hitzewellentage, welche innerhalb einer Hitzewelle auftreten, aufsummiert für Dekaden des Zeitraumes 1950 bis 2019 für 22 deutsche Städte (Städte im Uhrzeigersinn von Nord nach Süd sortiert). Bei Städten markiert mit * liegt ein statistisch signifikant positiver Trend vor (Hitzewelle: 3 aufeinander folgende Tage mit Temperaturen oberhalb des 90. Perzentil +/- 15 Tagen, mindestens jedoch größer als 30 °C).
*Net diagram with the number of heatwave days, which occurred within a heat wave, summed up for the decades of 1950 to 2019 for 22 German towns (towns sorted clockwise from north to south). Cities marked with * show a statistically significant trend. (Heatwaves: 3 consecutive days with temperatures above the 90th percentile and at least higher than 30 °C +/- 15 days).*

3.5 Diskussion

Konsistenzprüfung
Die Dürreanalyse für die Jahre 2017 bis 2019 zeigte, dass die Regionen sehr unterschiedlich von Dürren betroffen waren: in NRW wurden drei Jahre in Folge Dürremonate im Sommer verzeichnet, wohingegen in den meisten Städten nur 2018 als Dürresommer auffiel, nicht jedoch das Jahr 2019. München ist hier eine bemerkenswerte Ausnahme, da dort im Jahr 2018 keine Dürrephase identifiziert wurde. Eine Kontrolle der täglichen Niederschlagsmengen für die Station München für den Sommer ergab teilweise recht hohe Niederschlagswerte an wenigen, einzelnen Tagen (z. B. ein Starkregenereignis von 61 mm am 12. Juni 2018, DWD 2018) und durchschnittliche Niederschlagsmengen für alle anderen Monate (außer im April und November). Per Definition (siehe Abschnitt 2.1) zählen einzelne Monate nicht als Dürrephase.

Die in Abschnitt 3.4 abgeleitete Zunahme von Hitzewellen wird so auch in anderen Studien gefunden (z. B. TOMCZYK & BEDNORZ, 2016), in welchen für einzelne Städte bzw. für ganz Deutschland eine Zunahme von Frequenz, Länge und Intensität innerhalb der letzten vier Dekaden nachgewiesen wurde.

Die Trendanalyse über 70 Jahre ergab keine deutschlandweit homogene Zunahme von Dürren, aber eine klare Zunahme von Compoundereignissen. Ein Vergleich dieser Resultate mit anderen Studien ist aufgrund methodischer Unterschiede nur eingeschränkt möglich. Untersuchungen von LÜTTGER & FEIKE (2018) zeigen ebenfalls Dürrezunahmen im gesamten Bundesgebiet (jedoch nicht speziell für den urbanen Raum), sie betrachteten dies jedoch für niederschlagsfreie Perioden mit einer Dauer von 5 bis 11 Tagen (1900 bis 2013). Die Autoren zeigen z. B. eine Zunahme von 11-tägigen niederschlagsfreien Perioden, besonders in der Mitte der 1930er, 1970er und um das Jahr 2003, sowie eine klare Zunahme an Dürretagen im Norden und im Zentrum von Deutschland.

Ein Vergleich mit anderen Compoundstudien für deutsche Städte ist derzeit nicht möglich. Die einzige vergleichbare Studie untersucht für den europäischen Raum das Auftreten von Compoundereignissen und konzentriert sich auf die Untersuchung von Hotspots im Süden von Europa (SUTANTO et al., 2020).

Unsicherheiten
Die Studie weist eine Reihe an methodischen und Datenunsicherheiten auf. Insgesamt lassen sich auf Grundlage der betrachteten

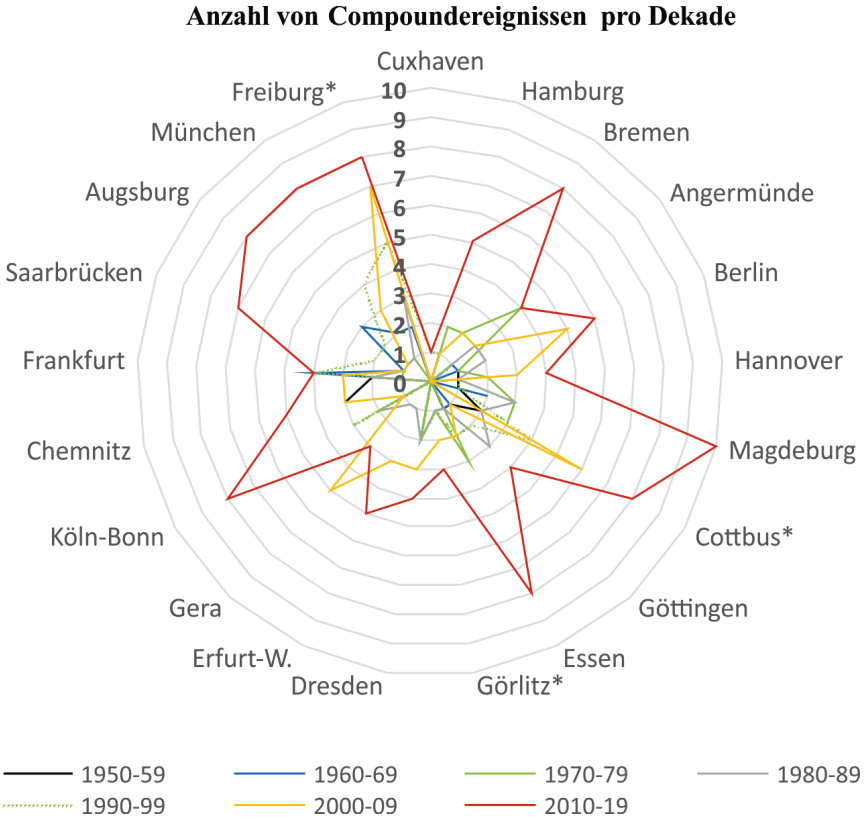

Abbildung 9
Netzdiagramm mit der Anzahl von Compoundereignissen (gleichzeitiges Auftreten eines Dürremonats und einer Hitzewelle) aufsummiert für Dekaden für den Zeitraum 1950 bis 2019 für 22 Städte (Städte im Uhrzeigersinn von Nord nach Süd sortiert).
Net diagram with the number of compound events (concurrent drought and heat wave) summed up for decades of 1950 to 2019 for 22 towns (towns sorted clockwise from north to south).

31 Stationen (bzw. 22 Stationen für die Compoundanalyse) keine regionalen Zusammenhänge zwischen den identifizierten Extrema und Topographie, Orographie oder sonstigen Gradienten ableiten; hierzu sollten in einer größer angelegten Studie neben den urbanen auch andere Messstationen einbezogen werden. Des Weiteren betrachtet der SPI das unterdurchschnittliche Verhalten von monatlichen Niederschlägen, gibt jedoch keine Informationen über Zeiträume, in welchen gar kein Niederschlag fällt.

Aufgrund von geringer Datenverfügbarkeit lagen nicht alle ausgewählten Stationen direkt im Zentrum der Städte (siehe Anhang 1). Es fehlt hier eine Überprüfung der Dürredynamiken an mehr als einer Station pro Stadt sowie entlang von Stadt-Umland-Gradienten, um den heterogenen Einfluss des urbanen Raums auf lokale Niederschlagsmuster berücksichtigen zu können (PAGENKOPF, 2010). Dieser Stadt-Land-Vergleich ist jedoch nicht trivial, da bereits das Stadtfeld selber das Niederschlagsgeschehen in Luv- und Lee-Richtungen signifikant beeinflusst, und dementsprechend eine Vielzahl an Stationen im gesamten Umkreis einer Großstadt zu betrachten sind; diese Analyse geht jedoch über die in dieser Studie gestellten Zielvorstellungen hinaus.

Für die Berechnung von Compoundereignissen gibt es bisher keine einheitliche Vorschrift. Der Begriff Compoundereignis wurde erstmalig vom IPCC etabliert (SENEVIRATNE et al., 2012), bisher ist die Verwendung des Begriffes jedoch kaum präzisiert (LEONARD et al., 2014; ZSCHEISCHLER et al., 2018; ZSCHEISCHLER et al., 2020). In dieser Analyse wurde ein Compoundereignis gezählt, wenn eine mindestens 3-tägige Hitzewelle in einen Dürremonat fiel. Nicht evaluiert wurde jedoch, ob in dem Dürremonat mehrere Hitzewellen auftraten oder wie lang diese Hitzewellen über die drei Tage hinweg tatsächlich andauerten. Da gerade in den letzten Dekaden nicht nur die Häufigkeit, sondern auch die Längen von Hitzewellen (TOMCZYK & BEDNORZ, 2016; FENNER et al., 2018) in Deutschland zugenommen haben, könnte dies potenziell negative Auswirkungen von Compoundereignissen zusätzlich verstärken.

Auswirkungen

Diese Arbeit soll eine Grundlage schaffen, um die kurz- und langfristigen Auswirkungen von Dürren und Compoundereignissen auf den urbanen Wasserhaushalt und das urbane Grün abschätzen zu können. Unsere Dürreanalyse zeigt, dass z. B. die Vegetation bei den nordrheinwestfälischen Stationen aufgrund der nachgewiesenen drei Dürresommer in Folge stärker von Wasserdefizit betroffen sein könnte als die anderen untersuchten Standorte. Allerdings zeigt sich hier der Nachteil der Analyse mittels SPI im Vergleich zu einem statischen, pflanzenbezogenen Grenzwert. Während man bei Verwendung statischer Grenzwerte genau ableiten könnte, ob eine niederschlagsarme Phase zu Schäden führen kann, lässt sich dies in dieser Studie nicht mit Sicherheit sagen. Gerade die Stationen Bremen, Bielefeld, Gelsenkirchen und Essen können mit mittleren jährlichen Niederschlagssummen von 697 mm, 832 mm, 817 mm und 843 mm absolut betrachtet nicht als trockenheitsgefährdet bezeichnet werden. Unter Umständen war die urbane Vegetation in den "Dürrejahren" hier besser versorgt als Stadtbäume in Magdeburg (mittlere jährliche Niederschlagssummen von 498 mm) in durchschnittlich niederschlagreichen Jahren.

Wir empfehlen daher die gemeinsame Auswertung unserer Ergebnisse zusammen mit den Ergebnissen von Bodenspeicher- und Wasserbedarfsmodellen. Zum Beispiel kann ein moderat verdichteter, mit Bauschutt und anderen Ablagerungen verunreinigter reiner Sand bis zu einer effektiven Durchwurzelungstiefe von 2 m etwa 140 mm Niederschlag pflanzenverfügbar speichern. Eine Rasenfläche kann im Hochsommer etwa 7 mm pro Tag ausschöpfen, d. h. nach ca. 20 Tagen sollte es wieder regnen. Dieses Beispiel zeigt, dass die monatliche Auflösung eine Schwachstelle dieser Analyse ist.

Wichtig wäre für die Ableitung von Schwellenwerten eine Analyse der Wasserbedarfe isolierter urbaner Vegetationsformen, wie z. B. von Straßenbäumen, kleinen Grünflächen oder Gründächern, da hier anzunehmen ist, dass diese im urbanen Umfeld bedingt durch Advektion aus vegetationsfreien Bereichen, ähnlich wie Oaseneffekte, einen höheren Wasserbedarf haben als vergleichbare Vegetationsformen in ruralen Gebieten.

Die Auswirkungen von Compoundereignissen auf Vegetation sind bis auf wenige Ausnahmen (z. B. BUTTLAR et al., 2018; ZSCHEISCHLER et al., 2017; DE BOECK et al., 2011) noch weitestgehend unerforscht. Hier muss man unterscheiden, ob es zu negativen Auswirkungen hauptsächlich durch eine der Teilkomponenten (Dürre oder Hitzewellen) oder durch deren Kombination kommt, und ob der aus der Kombination entstehende Schaden additiv ist oder überproportional stärker ausfallen kann.

BUTTLAR et al. (2018) untersuchten den Einfluss von Compoundereignissen auf die Funktion von Ökosystemen im Kohlenstoffkreislauf und stellten fest, dass sie zu einer stärkeren Reduktion von Kohlenstoffsenken führen, als Dürren und Hitzewellen separat. ZSCHEISCHLER et al. (2017) fanden heraus, dass das Auftreten von trockenen und heißen Bedingungen sich stark negativ auf Ernteerträge in Europa (z. B. Maiserträge in Deutschland) auswirkt und diese Auswirkungen bei einer isolierten Betrachtung von Temperatur und Niederschlag möglicherweise unterschätzt werden. Eine experimentelle Studie von DE BOECK et al. (2011) kam ebenfalls zu dem Ergebnis, dass sich die negativen Effekte von als Compoundereignis auftretenden Hitzewellen und Dürren auf das Pflanzenwachstum verstärken.

Die oben vorgestellte Compoundanalyse zeigte, dass die beiden Komponenten regional mit einem sehr unterschiedlichen Anteil an der Zunahme von Compoundereignissen verantwortlich sind. Auch das zeitliche Auftreten von Dürrephasen und Compoundereignissen im Jahreslauf muss bei einer weitergehenden Analyse ihrer ökologischen Folgen berücksichtigt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Erstaunlich wenig ist bekannt über die Extrema, Trends und regionalen Unterschiede von städtischen Dürren und noch weniger zu Compoundereignissen, also Zeiträumen mit gleichzeitig auftretenden Dürren und Hitzewellen im urbanen Raum. Unsere Studie bestätigt, dass im Jahr 2018 an (fast) allen Standorten eine langanhaltende Dürre auftrat, jedoch war diese nur halb so lang wie die längsten Dürren innerhalb der letzten 70 Jahre. Des Weiteren konnten wir zeigen, dass für die meisten untersuchten Standorte nicht per se eine Zunahme an Dürren zu verzeichnen ist, jedoch eine klare Zunahme von Compoundereignissen, welche hauptsächlich auf die Zunahme von Hitzewellen zurückzuführen sind. Temperaturen im urbanen Raum sind im Normalfall höher als in den umliegenden Gebieten, daher ist anzunehmen, dass die Compoundereignisse im urbanen Raum stärker ausgeprägt sind; dies müsste jedoch entlang eines Stadt-Land-Gradienten weiter untersucht werden.

Bei der Analyse des Langzeitverhaltens des Niederschlags wurden Zeiträume identifiziert, in denen bereits in früheren Dekaden, z. B. den 1960ern und 1970ern, in aufeinanderfolgenden Jahren langanhaltende Dürren aufgetreten sind; eine ähnliche Häufung von Hitzewellen in früheren Dekaden wurde jedoch nicht detektiert. Das deutet – bei aller methodisch bedingter Vorsicht – auf eine neue Qualität von Hitze und Trockenstress für Stadtgrün hin, auf welche die Planung z. B. mit angepassten Wurzelraumvorgaben und Speichervolumina reagieren sollte. Wir sehen ebenfalls Diskussionsbedarf bezüglich der Trinkwasserversorgung, zumindest für die Stadtstaaten.

Die vorliegende Studie betrachtet die Dauer von Niederschlagsdefiziten (definiert als moderate Dürren), bewertet jedoch weder die explizite Trockenphasenlänge (also Zeiträume, wo kein Niederschlag fällt), Schwere (relative Größe des Wasserdefizits) noch die Intensität der Dürre (Schwere bezogen auf die Dürrelänge), noch wie sich die Defizite auf Bodenfeuchtedynamiken und Vegetationszustände auswirken. Diese Arbeiten stehen noch aus, sind jedoch schwierig umsetzbar, da nur wenige bzw. keine Langzeitdatensätze hierfür zur Verfügung stehen (REINERMANN et al., 2019). Eine gekoppelte Betrachtung des Einflusses von Dürren und einem Temperaturanstieg (innerhalb von Hitzewellen, aber auch bezüglich sich erhöhender Durchschnittstemperaturen in den Sommermonaten) und deren kumulativen Effekte erscheinen notwendig, um aktuelle und zukünftige Auswirkungen von urbanen Dürren besser abschätzen zu können und geeignete Gegenmaßnahmen zu planen.

Summary and Outlook

Surprisingly little is known about the extremes, trends and regional differences of urban droughts and even less about compound events, i.e. periods with concurrent droughts and heat waves in urban areas. Our study confirms that a long drought period occurred in (almost) all locations in 2018, but it was only about half as long as the worst droughts in the past 70 years. Furthermore, we were able to show that for most of the locations examined there was no increase in droughts per se, but a clear increase in compound events. When analyzing the long-term behaviour of the precipitation, periods were identified in previous decades, e.g. the 1960s and 1970s, which have seen prolonged droughts in consecutive years; however, a similar accumulation of heat waves in previous decades was not detected. This implies – subject to all methodological caution – a new quality of heat and dryness stress on urban green, to which plants in cityscapes which must be taken into account in urban the planning, e.g. through an adaptations of the requirements for root systems and water storage volumes. We also see a need to review municipal drinking water supply networks, at least in the city-state metropolises.

The present study examined the duration of precipitation deficits (defined as moderate droughts), but neither assessed the severity nor the intensity of the deficits, nor how the deficits affected soil dynamics and vegetation status; these studies are still pending, but it are difficult to implement because only a few or no long-term data sets are available (REINERMANN et al., 2019). A coupled analysis of the influence of droughts and a rise in temperature (within heat waves, but also with regard to increasing average temperatures in the summer months) and their cumulative effects appear necessary in order to better estimate current and future effects of urban droughts.

Anschriften der Verfasser
Prof. Dr. Eva Nora Paton
Dr. Björn Kluge
Dr. Thomas Nehls
Institut für Ökologie
FG Ökohydrologie
Technische Universität Berlin
Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin
eva.paton@tu-berlin.de
bjoern.kluge@tu-berlin.de
thomas.nehls@tu-berlin.de

Johannes Vogel
Institut für Ökologie
FG Ökohydrologie
Technische Universität Berlin
Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin
Institut für Umweltwissenschaften und Geografie
FG Hydrologie und Klimatologie
Universität Potsdam
Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam
joschavogel@uni-potsdam.de

Literaturverzeichnis

BUTTLAR, J., VON ZSCHEISCHLER, J., RAMMIG, A., SIPPEL, S., REICHSTEIN, M., KNOHL, A., JUNG, M., MENZER, O., ARAIN, M.A., BUCHMANN, N., CESCATTI, A., GIANELLE, D., KIELEY, G., LAW, B.E., MAGLIULO, V., MARGOLIS, H., MCCAUGHEY, H., MERBOLD, L., MIGLIAVACCA, M., MONTAGNANI, L., OECHEL, W., PAVELKA, M., PEICHL, M., RAMBAL, S., RASCHI, A., SCOTT, R.L., VACCARI, F.P., VAN GORSEL, E., VARLAGIN, A., WOHLFAHRT, G. & M.D. MAHECHA (2018): Impacts of droughts and extreme temperature events on gross primary production and ecosystem respiration: a systematic assessment across ecosystems and climate zones. Biogeosciences 15, 1293–1318. DOI: 10.3929/ethz-b-000224136.

CIAIS, P., REICHSTEIN, M., VIOVY, N., GRANIER, A., OGÉE, J., ALLARD, V., AUBINET, M., BUCHMANN, N., BERNHOFER, C., CARRARA, A., CHEVALLIER, F., NOBLET, N. DE., FRIEND, A.D., FRIEDLINGSTEIN, P., GRÜNWALD, T., HEINESCH, B., KERONEN, P., KNOHL, A., KRINNER, G., LOUSTAU, D., MANCA, G., MATTEUCCI, G., MIGLIETTA, F., OURCIVAL, J.M., PAPALE, D., PILEGAARD, K., RAMBAL, S., SEUFERT, G., SOUSSANA, J.F., SANZ, M. J., SCHULZE, E.D., VESALA, T. & R. VALENTINI (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. Nature 437, 529–533. DOI: 10.1038/nature03972.

DALE, A.G. & S.D. FRANK (2017): Warming and drought combine to increase pest insect fitness on urban trees. PLoS ONE 12(3): e0173844. Doi:10.1371/journal.pone.0173844.

DE BOECK, H.J., BASSIN, S., VERLINDEN, M., ZEITER, M. & E. HILTBRUNNER (2016): Simulated heat waves affected alpine grassland only in combination with drought. The New phytologist 209, 531–541. DOI: 10.1111/nph.13601.

DE BOECK, H.J., DREESEN, F.E., JANSSENS, I.A. & I. NIJS (2011): Whole-system responses of experimental plant communities to climate extremes imposed in different seasons. The New phytologist 189, 806–817. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03515.x.

DELLA-MARTA, P.M., HAYLOCK, M.R., LUTERBACHER, J. & H. WANNER (2007): Doubled length of western European summer heat waves since 1880. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112, D15103. DOI: 10.1029/2007jd008510.

DWD CLIMATE DATA CENTER (CDC) (2018): Historical monthly station observations (temperature, pressure, precipitation, sunshine duration, etc.) for Germany, version v007. Onlineressource: https://cdc.dwd.de/portal.

FENNER, D., HOLTMANN, A., KRUG, A. & D. SCHERER (2018): Heat waves in Berlin and Potsdam, Germany – Long-term trends and comparison of heat wave definitions from 1893 to 2017. International Jorunal of Climatology. DOI: 10.1002/joc.5962.

GÄDEKE, A., POHLE, I., KOCH, H. & U. GRÜNEWALD (2017): Trend analysis for integrated regional climate change impact assessments in the Lusatian river catchments (north-eastern Germany). Reg Environ Change 17:1751-1762.

GANGULI, O. & A. GANGULY (2015): Space-time trends in U.S: meterological droughts. Journal of Hydrology: Regional Studies, 8, 235-259. DOI: 10.1016/j.ejrh.2016.09.004.

GOLDEN, H.E. & N. HOGHOOGHI (2018): Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science. WIREs Water 2018, 5:e1254. Doi: 10.1002/wat2.1254.

HEUDORFER, B. & K. STAHL (2016): Comparison of different threshold level methods for drought propagation analysis in Germany. Hydrology Research. 48. DOI: 10.2166/nh.2016.258.

HIPEL, K.W. & A.I. MCLEOD (2005): Time Series Modelling of Water Resources and Environ-mental Systems. Electronic reprint of our book orginally published in 1994. http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim/1994Book/.

LEONARD, M., WESTRA, S., PHATAK, A., LAMBERT, M., VAN DEN HURK, B., MCINNES, K., RISBEY, J., SCHUSTER, S., JAKOB, D. & M. STAFFORD-SMITH (2014): A compound event framework for understanding extreme impacts. WIREs Clim Change 5, 113–128. DOI: 10.1002/wcc.252.

LI, D., SUN, T., LIU, M., YANG, L., WANG, L. & Z. GAO (2015): Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves. Environmental Research Letters, 10, 054009. DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054009.

LÜTTGER, A.B. & T. FEIKE (2018): Development of heat and drought related extreme weather events and their effect on winter wheat yields in Germany.

MANNING, C., WIDMANN, M., BEVACQUA, E., VAN LOON, A.F., MARAUN, D. & M. VRAC (2019): Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950–2013). Environ. Res. Lett. 14, 94006. DOI: 10.1088/1748-9326/ab23bf.

MCKEE, T., NOLAN, B., DOESKEN, J. & J. KLEIST (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eight Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993 Anaheim, California. Conference Proceeding.

MIRALLES, D.G., TEULING, A.J., VAN HEERWAARDEN, C.C. & J. VILÀ-GUERAU DE ARELLANO (2014): Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. Nature Geosci 7, 345–349. DOI: 10.1038/ngeo2141.

MISHRA, A.K. & V.P. SINGH (2010): A review of drought concepts. Journal of Hydrology 391, 202–216. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.

PAGENKOPF, A. (2010): Urbane Niederschlagsbeeinflussung – Genese und räumliche Differenzierung am Beispiel von Berlin. Dissertation Geographisches Institut, Humbodt-Universität Berlin.

PERKINS, S.E., ALEXANDER, L.V. & J.R. NAIRN (2012): Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. Geophysical Research Letters, 39, L20714. DOI: 10.1029/2012GL053361.

REICHSTEIN, M., CIAIS, P., PAPALE, D., VALENTINI, R., RUNNINGS, S., VIOVY, N., CRAMER, W., GRANIER, A., OGÉE, J., ALLARD, V., AUBINET, M., BERNHOFER, C., BUCHMANN, N., CARRARA, A., GRÜNWALD, T., HEIMANN, M., HEINESCH, B., KNOHL, A., KUTSCH, W., LOUSTAU, D., MANCA, G., MATTEUCCI, G., MIGLIETTA, F., OURCIVAL, J.M., PILEGAARD, K., PUMPANEN, J., RAMBAL, S., SCHAPHOFF, S., SEUFERT, G., SOUSSANA, J.-F., SANZ, M.-J., VESALA, T. & M. ZHAO (2007): Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. Global Change Biol 13, 634–651. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01224.

REINERMANN, S., GESSNER, U., ASAM, S., KUENZER, C. & S. DECH (2019): The Effect of Droughts on Vegetation Condition in Germany: An Analysis Based on Two Decades of Satellite Earth Observation Time Series and Crop Yield Statistics.

SCHAFFITEL, A., SCHUETZ, T. & M. WEILER (2019): A distributed soil moisture, temperature and infiltrometer dataset for permeable pavements and green spaces, Earth Syst. Sci. Data Discuss. DOI: 10.5194/essd-2019-97, in review.

SENEVIRATNE, S.I., NICHOLLS, N., EASTERLING, D., GOODESS, C.M., KANAE, S., KOSSIN, J., LUO, Y., MARENGO, J., MCINNES, K. & M. RAHIMI (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: IPCC (Ed.) 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. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109–230.

STAHL, K., HISDAL, H., HANNAFORD, J., TALLAKSEN, L.M., VAN LANEN, H.A.J., SAUQUET, E., DEMUTH, S., FENDEKOVA, M. & J. JO´DAR (2010): Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. Hydrol Earth Syst Sci 14:2367–2382. DOI:10.5194/ hess-14-2367-2010.

STEWART, I.D., T.R. OKE (2012): Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12): 1879-1900.

STRATOPOULOS, L.M.F., ZHANG, C., HÄBERLE, K-H., PAULEIT, S., DUTHWEILER, S., PRETZSCH, H. & T. RÖTZER (2019): Effects of Drought on the Phenology, Growth, and Morphological Development of Three Urban Tree Species and Cultivars. Sustainability 2019, 11, 5117. Doi:10.3390/su11185117.

SUTANTO, S.J., VITOLO, C., DI NAPOLI, C., D'ANDREA, M. & H.A.J. VAN LANEN (2020): Heatwaves, droughts, and fires: Exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale, Environment International, 134,105276. Doi: 10.1016/j.envint.2019.105276.

TATE, E.L. & A. GUSTARD (2000): Drought Definition: A Hydrological Perspective. In: Vogt, J.V., Somma, F. (eds) Drought and Drought Mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol 14. Springer, Dordrecht.

TOMCZYK, A.M. & E. BEDNORZ (2016): Heat waves in central Europe and their circulation conditions. International Journal of Climatology, 36, 770–782. DOI: 10.1002/joc.4381.

VICENTE-SERRANO, S.M., BEGUERÍA, S. & J.I. LÓPEZ-MORENO (2010): A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. Journalof Climate 23, 1696. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

WILHITE, D.A. & M.H. GLANTZ (1985): Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. Water International 10, 111–120. DOI: 10.1080/02508068508686328.

ZINK, M., SAMANIEGO,L., KUMAR,R., THOBER, S., MAI, J., SCHÄFER, D. & A. MARX (2016): The German drought monitor. Environ. Res. Lett. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074002.

ZSCHEISCHLER, J., ORTH, R. & S.I. SENEVIRATNE (2017): Bivariate return periods of temperature and precipitation explain a large fraction of European crop yields. DOI: 10.3929/ETHZ-B-000190400.

ZSCHEISCHLER, J., WESTRA, S., VAN DEN HURK, B.J.J.M., SENEVIRATNE, S.I., WARD, P.J., PITMAN, A., AGHAKOUCHAK, A., BRESCH, D.N., LEONARD, M., WAHL, T. & X. ZHANG (2018): Future climate risk from compound events. Nature Clim Change 8, 469–477. DOI: 10.1038/s41558-018-0156-3.

ZSCHEISCHLER, J., VAN DEN HURK, B., WARD, P.J. & S. WESTRA (2020): Multivariate extremes and compound events. In: Sillmann, J., Sippel, S., Russo, S. (Eds.) Climate extremes and their implications for impact and risk assessment. Elsevier, pp. 59–76.