

Professur für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Lenard Gerke

Anthropogene Einflüsse auf hydrologische Dürren in Deutschland

Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Stahl

Freiburg im Breisgau, SoSe 2017

Professur für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Masterarbeit zum Thema

Anthropogene Einflüsse auf hydrologische Dürren in Deutschland

Autor: Lenard Frederic Gerke
lenard.gerke@posteo.de

Betreuer: Prof. Dr. Kerstin Stahl

Korreferent: apl. Prof. Dr. Jens Lange

Abgabedatum: 25.08.2017

I Abstract

A drought is a natural hazard that can cause immense damage to people directly but can also affect ecosystems. Knowledge about the development and propagation of droughts through the hydrological circle is essential to minimize these damages. Therefore the anthropogenic influence on hydrological droughts, which is claimed by studies, is examined in this thesis. The focus is on the influence of reservoirs in Germany. 554 gauges are examined whether they have an effect on the drought characteristics. The standardized precipitation index is used to obtain relative information, but also the trends of drought characteristics are analysed using a threshold approach. The days of drought and the drought deficit increases in most of the gauges, but a few decreased. It is possible to see the anthropogenic influence in two case studies. For a general conclusion the methods of analysis are not precise enough and more additional data is needed to relate changes in the streamflow drought to human activities.

II Kurzfassung

Dürren sind eine der folgenreichsten Naturkatastrophen, die weltweit Ökosysteme und auch den Menschen beeinträchtigen. Das Verständnis und die Vorhersage sind ein wichtiger Faktor, um Gegenmaßnahmen zu ergreifen oder wenigstens die Auswirkungen zu begrenzen. Dass auch der Mensch einen Einfluss auf Dürren hat, wurde in vielen Studien bereits nachgewiesen. In dieser Arbeit wird der Fokus vor allem auf den Einfluss von Staudämmen gelegt. Dazu werden 554 Pegel auf anthropogenen Einfluss untersucht. Mit Hilfe eines standardisierten Ansatzes und einer Trendanalyse der Charakteristiken der Dürren wird aufgezeigt, wo dieser Einfluss nachweisbar ist. Eine Mehrheit der Pegel weist zunehmende Dürretage und ein zunehmendes Dürredefizit auf. Allerdings gibt es auch Gegenbeispiele, anhand derer anthropogener Einfluss gut deutlich wird. Zwei Fallbeispiele, bei denen dieser Nachweis gelingt, werden diskutiert, für eine grundsätzliche Aussage über den anthropogenen Einfluss sind aber nicht genug Daten und Ergebnisse vorhanden. Eine breitere Datenbank von bekannte Einflüssen könnte helfen, diese speziell mit der Dürreentwicklung zu verknüpfen.

II Inhaltsverzeichnis

I	Abstract	I
II	Kurzfassung	I
II	Inhaltsverzeichnis	III
IV	Abbildungsverzeichnis	V
V	Tabellenverzeichnis	VI
VI	Abkürzungsverzeichnis	VII
1	Einleitung	2
2	Stand der Wissenschaft	4
2.1	Definition von Dürre	4
2.2	Methoden zur Dürreidentifikation	5
2.2.1	Schwellenwertmethode	5
2.2.2	Standardisierter Ansatz	6
2.3	Menschlicher Einfluss auf Dürren	7
2.3.1	Makroskalig	7
2.3.2	Meso- und mikroskalig	8
2.4	Einfluss durch Reservoirs	8
3	Daten und Methoden	10
3.1	Daten	10
3.2	Methodenübersicht	11
3.2.1	Standardized Precipitation Index	11
3.2.2	Pettitt-Test	12
3.2.3	Mann-Kendall-Test	12
3.3	Methodisches Vorgehen	13
3.3.1	Korrelation der Niederschlags- und Abflusszeitreihen	13
3.3.2	Wasserbilanz	15
3.3.3	Niedrigwasserbilanz	15
3.3.4	Veränderung der Dürrecharakteristiken	16
4	Ergebnisse	18
4.1	Korrelation der Niederschlags- und Abflusszeitreihen	18
4.2	Wasserbilanz	19
4.3	Veränderung des Niedrigwassers	19

4.4	Veränderung der Dürrecharakteristiken	20
5	Diskussion	30
5.1	Korrelation der Niederschlags- und Abflusszeitreihen	30
5.2	Wasserbilanz	30
5.3	Niedrigwasserbilanz	31
5.4	Veränderung der Dürrecharakteristiken	32
5.5	Synthese der Ergebnisse	32
5.5.1	Roth	32
5.5.2	Prims/Blies	33
5.5.3	Roter Main und Rugenwedelsau	34
5.5.4	Menschlicher Einfluss durch Talsperren	34
6	Schlussfolgerung und Fazit	36
7	Literaturverzeichnis	40
	Anhang	I
A	Verhalten SPI2 und SPI6 zu SSI	I

IV Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Menschlicher Einfluss durch Reservoirs	9
Abb. 2	Lage der Abflusspegel	10
Abb. 3	Verfügbarkeit der Abflusszeitreihen	11
Abb. 4	Flussdiagramm Berechnung der standardisierten Niederschlags- Ab- flussbeziehung	14
Abb. 5	Kategorien der Doppelsummenkurven	15
Abb. 6	Flussdiagramm zu Berechnung der Dürrecharakteristiken	16
Abb. 7	Korrelation zwischen dem SSI und dem SPI verschiedener Länge . . .	18
Abb. 8	Differenz der Niederschlag (P)-Abfluss (Q)-Korrelation über 40 Jahre	19
Abb. 9	Differenz der P-Q-Korrelation Prä-Wendepunkt (PRE-WP) und Post- Wendepunkt (POST-WP)	20
Abb. 10	Beispiele kumulierter Doppelsummenkurven	25
Abb. 11	Trend der NQ7	26
Abb. 12	Trend der Dürretag	27
Abb. 13	Trend der Dürredefizite	28
Abb. 14	Histogramm der Trends des niedrigstes 7-Tage-Mittel des Abflusses (NQ7).	31
Abb. 15	Doppelsummenkurve der Roth	32
Abb. 16	Abfluss der Roth 1990-2000	33
Abb. 17	Abfluss der Blies 1970-1990	34
Abb. 18	Korrelation des SPI.2 mit dem SSI	I
Abb. 19	Korrelation des SPI.6 mit dem SSI	II

V Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Übersicht der Flüsse mit einer Differenz der PRE-WP- und POST-WP-Korrelation $> 0,4$ bzw $< -0,4$ und einem P-Wert des Pettitt-Tests $< 0,05$	21
Tab. 2	Liste der Pegel mit signifikant negativer Entwicklung der Dürredefizite, sowie die fünf am stärksten ansteigenden Defizite nach Kendalls-Tau-Werten	21
Tab. 3	Synthesetabelle der Untersuchungen. Aufgelistet sind die Pegel mit Pegel_ID und Gewässername, bei welchen eine Veränderung des Abflussverhaltens (P-Q-Doppelsummenkurve, Wendpunkte Korrelation Standardized Streamflow Index (SSI) SPI.2 (SPI2)) und im Niedrigwasserbereich bzw den Dürrecharakteristiken(Kendalls Tau)	22

VI Abkürzungsverzeichnis

EZG	Einzugsgebiet
SPI	Standardized Precipitation Index
SSI	Standardized Streamflow Index
PRE-WP	Prä-Wendepunkt
POST-WP	Post-Wendepunkt
P	Niederschlag
Q	Abfluss
PET	potentielle Evapotranspiration
ET	Evapotranspiration
NQ7	niedrigstes 7-Tage-Mittel des Abflusses
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI2	SPI_2

1 Einleitung

Eine der folgenreichsten Naturkatastrophen der Erde sind Dürren. Sie können die Landwirtschaft, die Wasserressourcen und die Ökosysteme stark beeinflussen und in allen Bereichen großen Schaden anrichten. So können durch mangelnde landwirtschaftliche Erträge Hungersnöte entstehen, durch schlechte Wasserversorgung können sich Krankheiten ausbreiten und empfindliche Ökosysteme zerstört werden. In den Industrieländern können Dürren neben der Landwirtschaft auch ökonomischen Schaden im sekundären und tertiären Sektor hervorrufen. Sogar in Deutschland, wo es aufgrund des gemäßigten Klimas der Bevölkerung nicht bewusst ist, beeinträchtigen Dürren zunehmend auch die Wasserversorgung. Aufgrund dieser starken Bedeutung ist es wichtig, so viel wie möglich über die Eigenschaften, die Vorhersage, die Ausbreitung und Auswirkungen von Dürren zu wissen. Das Verständnis der beteiligten Prozesse kann helfen, die Intensität solcher Naturkatastrophen zu verringern und Anpassungsstrategien zu entwickeln.

Es liegt nahe, dass der Mensch mit seinen weitreichenden Veränderungen der Ökosysteme auf der ganzen Welt auch einen Einfluss auf den Wasserkreislauf hat. Dies ist eine anerkannte, vielfach bewiesene Tatsache. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass auch die Niedrigwasserperioden und Dürren anthropogen beeinflusst sind. Ohne den Einfluss des Menschen werden Dürren in Flüssen vom Zusammenspiel der Klimavariablen und der Einzugsgebietseigenschaften wie Jahreszeit, Vegetation, Topografie, Hydrogeologie u.a. gesteuert. In Deutschland allerdings gibt es quasi keine vom Menschen unbeeinflussten Einzugsgebiete mehr, da dieser auf verschiedenste Weise den Abfluss in den Flüssen beeinflusst.

Ziel dieser Arbeit ist es, den anthropogenen Einfluss auf Dürren in den Flüssen der letzten 50 Jahre (oder nach Verfügbarkeit) darzustellen und den Effekt auf die Charakteristiken einer Dürre wie Dauer, Frequenz oder Intensität aufzuzeigen. Dabei wird angenommen, dass sich durch die Analyse der Charakteristiken von Dürren menschliche Einflüsse nachweisen lassen können. Die folgenden Hypothesen werden in dieser Arbeit untersucht:

1. Abflussdürren in Deutschland werden grundsätzlich durch anthropogene Einflüsse verstärkt.
2. Das Aufstauen von Flüssen durch Talsperren vermindert die Auswirkungen von Dürren auf den Abfluss als Folge von Niedrigwassermanagement.

Dabei werden zunächst die verwendbaren Daten herausgesucht und aufbereitet, anschließend werden Veränderungen im Abflussverhalten aufgespürt und untersucht, ob diese Veränderungen im Abflussregime auch speziell im Auftreten von Dürren widerspiegelt werden. Ist eine Veränderung erkennbar, so wird für das betroffene Gebiet analysiert, ob hier ein anthropogener Einfluss zu ebendieser Veränderung geführt hat. Nach einem Einblick in die aktuelle Literatur zum Thema des menschlichen Einflusses auf Dürren werden

im Methodenteil zunächst ein paar für die Arbeit wichtige Methoden vorgestellt, ehe das grundsätzliche methodische Vorgehen dargestellt wird. Im Anschluss an die Präsentation der einzelnen Ergebnisse werden diese in einer Bewertungstabelle synthetisiert und anschließend diskutiert. Zum Abschluss wird dargelegt, welche Probleme es bei der Arbeit gab und welche Daten möglicherweise eine Betrachtung und eine qualitative Bewertung des anthropogenen Einflusses erleichtern könnten.

2 Stand der Wissenschaft

2.1 Definition von Dürre

Dürren sind Naturkatastrophen, die sich direkt oder indirekt auf die Wasserversorgung, die Landwirtschaft, die Wassertransportwege und die Energiegewinnung auswirken können (van Loon, 2015). Sie sind schwieriger nachzuweisen als z.B. Hochwasser, daher werden Dürren oft erst erkannt, wenn sie schon weit fortgeschritten sind und möglicherweise bereits Schäden verursacht haben (Beyene et al., 2014). Diese Schäden können direkt den Menschen oder die Natur betreffen, aber auch wirtschaftliche Auswirkungen können immens sein (Münchener Re, 2013). Aufgrund der Eigenschaft, dass Dürren häufig erst erkannt werden, wenn sie schon weit fortgeschritten sind, werden sie von einigen Autoren und vor allem von den Medien als „schleichende Katastrophe“ (Mishra and Singh, 2010) bezeichnet.

Dürren werden, je nachdem in welchem Teil des hydrologischen Kreislaufes sie auftreten, in entsprechende Kategorien eingeteilt: Meteorologischen Dürren, Dürren der Bodenfeuchte (landwirtschaftliche Dürren), hydrologische Dürren und sozioökonomische Dürren (van Loon, 2015; Wilhite and Glantz, 1985). Nach Mishra and Singh (2010) ist es sinnvoll, Dürren im Grundwasser als fünfte Kategorie hinzuzufügen. Häufig wird eine Dürreperiode mit einer meteorologischen Dürre mit unterdurchschnittlichem Niederschlag und/oder besonders hohen Temperaturen verursacht und pflanzt sich über mangelnde Bodenfeuchte zu einer hydrologischen Dürre fort, die auch in den Gewässern spürbar wird und sich je nach Einzugsgebietseigenschaften und Intensität auch im Grundwasser widerspiegelt. Daraus schließlich können ökonomische und soziale Einschränkungen folgen, für die der Begriff sozioökonomische Dürren verwendet wird. In dieser Arbeit ist mit dem alleinstehenden Begriff „Dürre“ stets die Dürre im hydrologischen System, gemessen als Abfluss am Pegel, gemeint.

Dürren werden in der Literatur oft allgemein mit der Definition von (Tallaksen and van Lanen, 2004) beschrieben: „Dürre ist eine Periode mit unterdurchschnittlicher Wasserverfügbarkeit. Sie ist ein wiederkehrendes weltweites Phänomen mit räumlichen und zeitlichen Eigenschaften, die signifikant von Region zu Region variieren.“ Zu beachten ist auch die klare Abgrenzung der Definition vom Niedrigwasser (bezieht sich lediglich auf Abflüsse), Trockenheit (andauernde Eigenschaft einer Klimazone, Dürren sind temporär), Wassermangel (Defizit in der Wasserversorgung, durch menschliches Handeln verursacht) oder Desertifikation (Missmanagement in trockenen Regionen, welches zum Verlust von Vegetationsdecken führt) (van Loon, 2015). Auch die Begriffe „Hitzewelle“ und „Waldbrand“ werden oft mit Dürren assoziiert. Sie können durchaus einen Bezug zu Dürren haben, denn Dürren der Bodenfeuchte können beispielsweise Hitzewellen verstärken oder Waldbrände begünstigen, der zeitliche Rahmen ist bei Dürren aber umfassender. Mishra

and Singh (2010) bemessen den Zeitrahmen in ihrem Review mit einer Dauer von Monaten bis Jahren.

Die Ursache einer Dürre ist oft ein unüblicher Rückgang oder ein Ausbleiben von Niederschlag, häufig einhergehend mit hohen Temperaturen und damit hohen Transpirationsraten (van Loon, 2015). Diese Dürren werden deshalb auch als Sommerdürren bezeichnet. Ein weiterer Grund für eine Dürre im hydrologischen System kann die Bindung von Wasser in Form von Schnee oder Eis sein. Liegen die Temperaturen unterdurchschnittlich tief oder setzt im Frühling der Tauprozess später als üblich ein, so kann auch dies zu deutlich niedrigeren Pegelständen führen.

2.2 Methoden zur Dürreidentifikation

Um Dürren und die dazugehörigen Prozesse zu verstehen, werden die Charakteristiken einer Dürre definiert und anschließend analysiert. Zu diesen Charakteristiken gehören der Zeitpunkt, die Intensität, die Dauer und die räumliche Ausdehnung. Da Dürren räumlich sehr verschieden auftreten und breit gefächerte Auswirkungen haben können, gibt es eine Vielzahl von Dürreindikatoren, welche versuchen, je nach Anwendungsgebiet eine Dürre sinnvoll zu beschreiben.

2.2.1 Schwellenwertmethode

Die Schwellenwertmethoden bestimmen die Dürrecharakteristiken durch das Vergleichen einer Zeitreihe mit einem vorher festgelegten Schwellenwert. Wird dieser unterschritten, befindet sich das System in einer Dürreperiode und es ist relativ einfach, die Dauer, das Defizit und die Wiederkehrhäufigkeit zu bestimmen. Eine gute Übersicht über die Schwellenwertmethode zur Charakterisierung von hydrologischen Dürren bietet Fleig et al. (2006), der beispielsweise verschiedene Pooling-Methoden evaluiert. Auch van Loon (2015) fasst die wichtigsten Vor- und Nachteile kompakt zusammen.

Idealerweise steht ein Schwellenwert in Beziehung zu einem von Dürre betroffenen Bereich, z.B. ein Mindestwasserstand für die Ökologie, ein Bedarf an Wasser zur Bewässerung oder Trinkwassergewinnung, Kühlwasserbedarf einer Industrieanlage oder einem Mindestwasserstand zur Schiffbarkeit eines Gewässers (van Loon, 2015). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen festen Schwellenwerten und variablen Schwellenwerten (Fleig et al., 2006). Wie der Schwellenwert festgelegt ist, hängt von der Intention des Anwenders ab. So ist der Bedarf zur Aufrechterhaltung des Schiffsverkehrs über das Jahr konstant, während der Bewässerungsbedarf in der Wachstumsperiode höher ist als nach der Ernte.

Da laut Definition einer Dürre ein Defizit in der Wasserverfügbarkeit anhaltend vorhanden sein muss, werden einzelne Tage, an welchen ein Abfluss einen variablen Schwellenwert unterschreitet, nicht immer gleich als Dürre bezeichnet. In der Literatur schwanken die An-

gaben, ab wann eine Niedrigwasserperiode eine Dürre ist, stark. Auch einzelne Unterbrechungen, beispielsweise durch kurze Niederschlagsereignisse während einer Dürreperiode, werden häufig nicht als das Ende einer solchen gewertet, da sich an der prinzipiellen Situation nichts ändert (Zelenhasić and Salvai, 1987). Das sogenannte „Pooling“ fasst kurze, einander bedingende Dürren zusammen (Fleig et al., 2006). Eine hierfür häufig verwendete Methode ist dabei das gleitende Mittel, welches über eine Zeitreihe gelegt wird und somit einzelne Ausreißer ausgleicht.

Die Identifikation von Dürreperioden mit einem festen Schwellenwert zieht nicht die Saisonalität des Abflusses in Betracht, welche vor allem in mediterranen Regionen zu natürliche Trockenphasen führen kann (López-Moreno et al., 2009). Dies wird eher durch den Ansatz erreicht, die Statistik des Abflussregimes zu verwenden. Verschiedene Autoren verwenden 70-95% -Percentile des Abflussregimes. Als Schwellenwert gilt dann jeweils der Wert, der an 70-95% der Tage überschritten wird. Somit kann der Schwellenwert über das Jahr angepasst werden und schwankt dem natürlichen Regime folgend.

2.2.2 Standardisierter Ansatz

Um die Probleme mit einem Schwellenwert zu vermeiden, wird ein standardisierter Index verwendet, vor allem wenn es nicht um konkrete anwendungsbezogene Betrachtungen geht. Beispielsweise Shukla and Wood (2008) wandte den von McKee et al. (1993) vorgestellten Ansatz des Standardized Precipitation Index (SPI) auch für Abflüsse an, wie es der Autor vorgeschlagen hatte. Dabei wird eine möglichst lange Datenzeitreihe an eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angepasst und diese in eine Normalverteilung transformiert, sodass ein Mittelwert von 0 und eine einheitliche Standardabweichung gegeben ist, woraus ein standardisierter Index entsteht.

Das Prinzip des SPI ist relativ einfach, wurde schon häufig angewandt (Mishra and Singh, 2010) und kann ohne große Probleme auch auf andere Bereiche der Hydrologie übertragen werden. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung, an die die Datenreihe angepasst wird, kann verändert sein. Auch der Zeitraum, welcher von SPI mit dem Normalwert verglichen wird, kann sich ändern. Laut Mishra and Singh (2010) kann der SPI sowohl für kurzzeitige Prozesse wie Veränderungen der Bodenfeuchte, welche in der Landwirtschaft von Bedeutung ist, verwendet werden, als auch für langfristige Bewertungen von Grundwasser und Aquiferen, welche langfristig auf schwankende Niederschlagsmuster reagieren.

Der Vorteil eines standardisierten Index ist dabei, dass verschiedene Dürreereignisse zeitlich und/oder räumlich miteinander verglichen werden können. Je extremer der Wert des SPI ist, desto seltener tritt er auf. So werden in der Literatur Werte < 2 als extrem trocken bezeichnet (Mishra et al., 2009). Einschränkungen bei der Verwendung des SPI sind die Länge der Zeitreihe und die Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die Verfügbarkeit der Daten spielt eine wichtige Rolle. Wenn beim Vergleich eines Niederschlags unterschiedli-

che Zeitreihen als Vergleichsmaß dienen, können die Ergebnisse stark variieren. So ist es entscheidend, ob bsp. besonders trockene oder feuchte Jahre mit in die Wahrscheinlichkeitsverteilung einfließen, da sie die Normalverteilung stark beeinflussen können (Mishra and Singh, 2010). Die Wahl der Verteilung ist laut Mishra and Singh (2010) vor allem bei trockenen Regionen ein Problem, da hier zu viele fehlende Abflüsse die Form der Verteilung deutlich verzerren können.

Mathematisch auf dem gleichen Prinzip beruhend, stellten Vicente-Serrano et al. (2010) den Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) vor. Da dieser Index auf dem P und der potentielle Evapotranspiration (PET) basiert, spiegelt er im Gegensatz zu SPI auch den Einfluss der Temperatur wider. Die bewertete Größe ist dabei $P - PET$, also das, was dem System effektiv auf natürlichem Wege zugeführt wird. Die Berechnung der PET kann dabei unterschiedlich komplex ausfallen. Während nach der Gleichung von Thornthwaite nur die Temperatur als Eingangsgröße benötigt wird, werden nach Hargreaves, Penman oder anderen Verfahren deutlich mehr Daten benötigt.

2.3 Menschlicher Einfluss auf Dürren

Das Auftreten von Dürren hängt nicht nur von der natürlichen klimatischen Variabilität ab, auch menschliche Aktivitäten können Dürren verursachen oder verstärken (van Loon et al., 2016). Beispiele für diese Einflüsse sind ein Landnutzungswandel, Bewässerung, der Bau von Talsperren und Reservoirs, Wasserentnahmen und indirekt auch der anthropogen verursachte Klimawandel (Mishra and Singh, 2010; van Loon et al., 2016). Je nach Betrachtungsskala ist der Einfluss unterschiedlich. Auf der globalen Skala kann dieser Einfluss nicht verallgemeinert werden, stattdessen sollten die verschiedenen klimatischen Bedingungen unterschiedlich beurteilt werden. Auf regionaler Ebene dagegen kann man sehr viel präzisere Aussagen treffen.

2.3.1 Makroskalig

Auf globaler Ebene gibt es wenige Studien zu dem Einfluss des Menschen auf Dürren (Wanders and Wada, 2015). Die allgemeineren Veränderungen des Klimas werden dagegen weltweit mit großem Interesse und Aufwand verfolgt. Wanders and Wada (2015) untersuchten den Einfluss des Klimawandels auf die Dürredefizite weltweit und wiesen einen erheblichen Anstieg der Defizite in verschiedenen Gebieten der Welt nach, unter anderem im nördlichen Afrika, den östlichen USA und Südeuropa. Generell wird häufig auf ein ansteigendes Dürrierisiko im Zuge des Klimawandels verwiesen (IPCC, 2014). Sheffield et al. (2012) hingegen halten die starke Zunahme allgemein für überschätzt und verweisen u.a. auf die mit dem Temperaturanstieg einhergehende Feuchtigkeitskapazität der Luft. Aufgrund dieses Effektes könne die Kausalität von höherer Temperatur und verstärkten Dürren nicht pauschalisiert werden.

2.3.2 Meso- und mikroskalig

Grundsätzlich führt eine hohe Bevölkerungsdichte zu einem höheren Wasserbedarf (Wanders and Wada, 2015). Dies kann zu einer verstärkten Wasserentnahme aus dem System führen und u.a. Grundwasserstände absenken. Für die Iberische Halbinsel z.B. konnten Vicente-Serrano et al. (2014) einen Trend zu häufigeren und intensiveren Dürren feststellen, der auf die höhere Evapotranspiration (ET) aufgrund steigender Temperaturen zurückgeht. Auch die gestiegene direkte Evaporation aus Reservoirs spielt dabei eine Rolle, da im mediterranen Raum in dem betrachteten Zeitraum hohe Temperaturen herrschten. Es ist davon auszugehen, dass dies auch in gemäßigten Klimaten eine Rolle spielt, die Bedeutung aber relativ gesehen deutlich geringer einzuschätzen ist.

2.4 Einfluss durch Reservoirs

Der Einfluss von Staudämmen auf hydrologische Dürren wurde in verschiedenen Studien untersucht. Rangelcroft et al. (2016) untersuchten einen Staudamm in Chile, indem sie die Dürreereignisse am Unterlauf vor und nach dem Bau des Staudammes 1998 verglichen. Sie wiesen einen ausgleichenden Effekt des Dammes nach. Sowohl die Häufigkeit als auch die Länge und Intensität der Dürren wurde geringer. Die Fortpflanzung der meteorologischen Dürre in das hydrologische System wurde verzögert, einzig Dürreereignisse über mehrere Jahre konnten nicht abgeschwächt werden.

López-Moreno et al. (2009) zeigen anhand eines Beispiels, wie der Bau eines Staudammes auf der Iberischen Halbinsel die Dürreperioden verlängert. Als Grund hierfür wird die Nutzung des Reservoirs zur Bewässerung der oberhalb liegenden Landwirtschaft genannt. Andere Zuflüsse unterhalb des Stausees hingegen mildern die Folgen der Dürre ab. In diesem Fallbeispiel profitieren die Oberlieger vom aufgestauten Wasser, während die Unterlieger gravierendere Dürren erleiden. In Zentraleuropa bewirken die Regulierungen der Reservoirs, dass der dürreintensivierende Effekt durch den erhöhten Wasserverbrauch ausgeglichen wird, wohingegen in Südeuropa der negative Effekt trotzdem überwiegt (Wanders and Wada, 2015).

Die Entnahme von Wasser wird als zunehmend vorausgesagt (Wanders and Wada, 2015). Dem entgegengesetzt könnte der Bau oder die Nutzung bereits bestehender Reservoirs helfen, die Dürren auszugleichen, indem bei hohen Niederschlägen Wasser gespeichert wird, um in Trockenphasen wieder freigegeben zu werden (Wanders and Wada, 2015). Dieses Vorgehen ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Allerdings stehen diese Maßnahmen nachvollziehbar im Gegensatz zu der Nutzung von Reservoirs als Staukapazität im Hochwasserfall (Di Baldassarre et al., 2017).

In Deutschland werden Reservoirs unter anderem genutzt um Niedrigwassererhöhung zu betreiben. Dies bedeutet bei trockenen Bedingungen den Abfluss künstlich auf einem

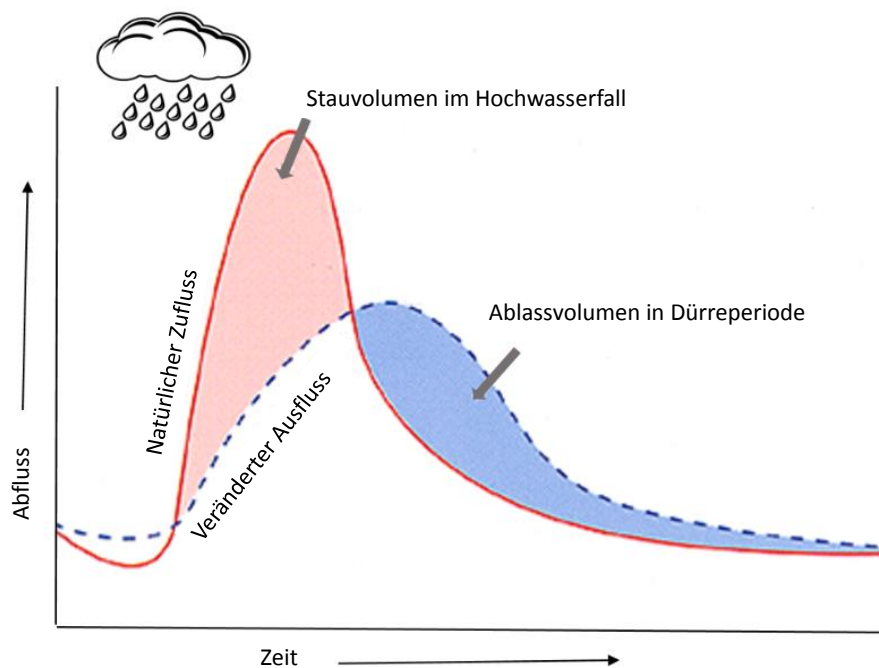


Abbildung 1 Menschlicher Einfluss durch Reservoirs. Schematische Darstellung des Einflusses eines Stausees auf hydrologische Extreme. Ausgleichend wirken sowohl der niedrigere Auslass (blaue Linie) bei Hochwasser im Einlauf (rote Linie) als auch höherer Auslass bei Niedrigwasserbedingungen (verändert nach (Di Baldassarre et al., 2017)).

bestimmten Niveau zu halten. Ökologische Gründe können dabei ebenso eine Rolle spielen wie wirtschaftliche, wenn es etwa darum geht, Kühlwasser für Kraftwerke zur Verfügung zu haben. Auf regionaler Ebene sind Dürren und die daraus folgenden Probleme bekannt. In Baden-Württemberg zum Beispiel wurde das „Dürrejahr 2003“ intensiv aufgearbeitet und auch Bayern hat den Bericht „Niedrigwasser in Bayern“ herausgebracht (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2016).

3 Daten und Methoden

3.1 Daten

Anhand von zwei verschiedenen Datensätzen soll der anthropogene Einfluss auf Flusssdürren dargestellt werden. Zum einen werden im Folgenden 516 mikro- und mesoskalige Einzugsgebiete untersucht, die als relativ gering durch den Menschen beeinflusst eingeschätzt und als naturnahe Einzugsgebiete bezeichnet werden. Zum anderen werden 37 Einzugsgebiete untersucht, in denen ein erkennbarer anthropogener Einfluss zu erwarten ist. Dieser erwartete Einfluss stammt überwiegend von Reservoirs, die entweder als Trinkwasserspeicher oder zum Wassermassenmanagement genutzt werden.

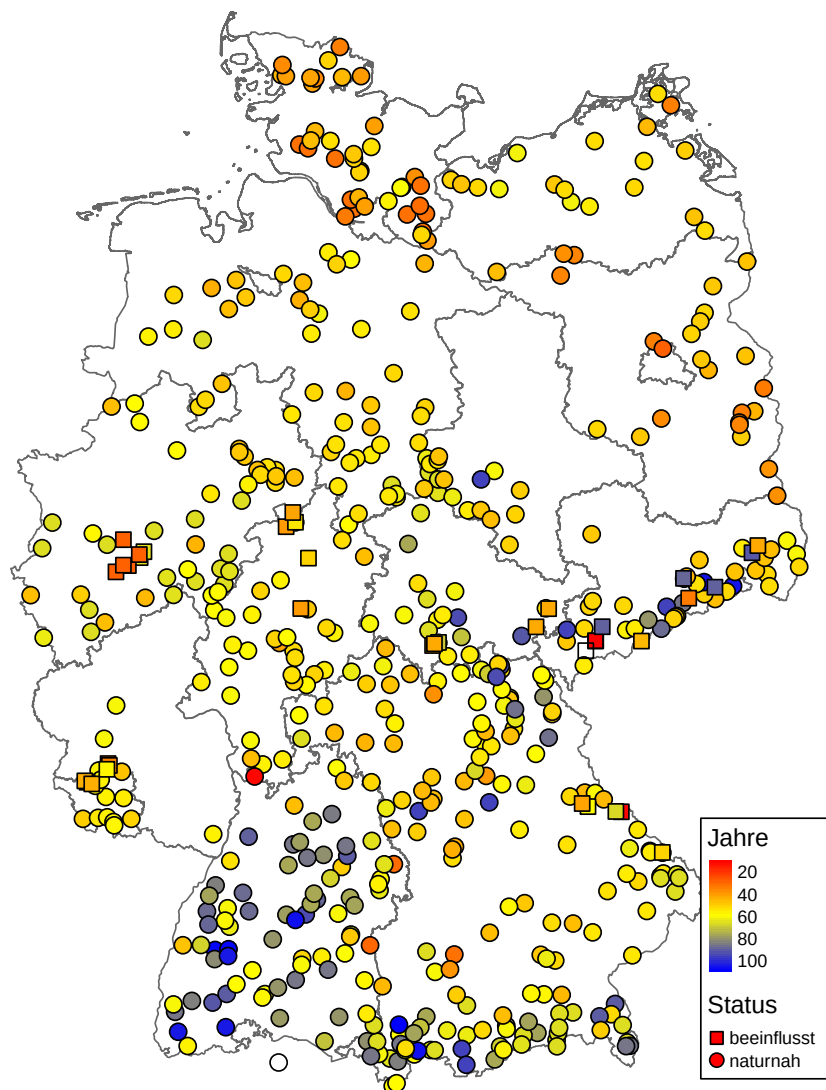


Abbildung 2 Lage der Abflusspegel. Dargestellt sind die Lage und die Datenverfügbarkeit der untersuchten Pegel. Die als naturnah vermuteten sind als Kreise, die potentiell beeinflussten als Quadrate dargestellt.

In dieser Arbeit werden Datenreihen des Niederschlags und des Abflusses untersucht. Die Abflussdaten von insgesamt 553 Pegeln wurden von verschiedenen Länderverwaltungen

bzw. Wasserverbänden im Rahmen des Dryer-Projektes zur Verfügung gestellt. Eine Tabelle mit den verschiedenen Datenquellen befindet sich im Anhang. Die Zeitspanne umfasst dabei 9 bis 108 Jahre. In Abbildung 6 ist die Verfügbarkeit aller Pegeldata über die Jahre übersichtlich dargestellt. Die Zeitreihen des Niederschlages entstammen dem EOPS-Datensatz, welcher Niederschlags- und Temperaturzeitreihen in einer Auflösung von 50 x 50km zur Verfügung stellt. Zeitreihen werden anteilig nach der Lage der Einzugsgebiete in den verschiedenen Rasterzellen berechnet und sind ab dem Jahr 1950 verfügbar.

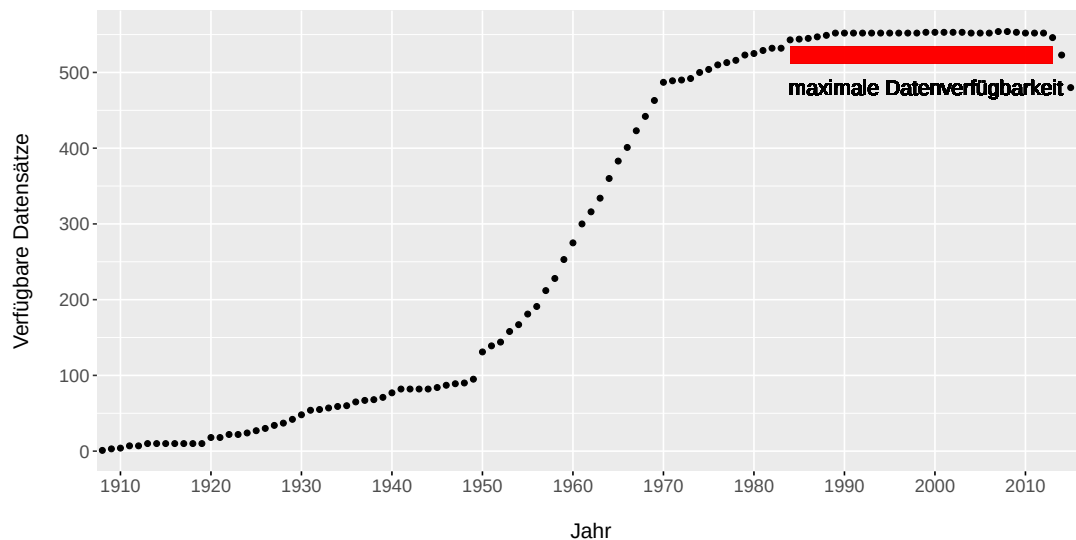


Abbildung 3 Verfügbarkeit der Abflusszeitreihen. Die Anzahl der verfügbaren Datenzeitreihen über die Jahre.

3.2 Methodenübersicht

Für die Bearbeitung der Fragestellung wurden einige Methoden verwendet, die im ersten Teil dieses Abschnittes erläutert werden. Im zweiten Teil wird das methodische Vorgehen beschrieben.

3.2.1 Standardized Precipitation Index

Der standardisierte Niederschlagsindex SPI gibt das Verhältnis des Niederschlages zum Normalwert für einen bestimmten Zeitraum an (McKee et al., 1993). Liegt der Niederschlag über dem Mittel, so ist der SPI positiv, liegt er darunter, ist er negativ. Analog dazu wird der SSI für den Abfluss verwendet. Die Berechnung des SPI erfolgt über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abflüsse über den gesamten verfügbaren Zeitraum des jeweiligen Pegels. Dabei werden zunächst die Datenreihen an eine Verteilung angepasst. Für den SPI wird die Gammaverteilung genutzt, wie es McKee et al. (1993) vorschlug, für den SSI wird die Log-Logistic-Funktion verwendet. Für den SSI haben Vicente-Serrano et al. (2012) untersucht, welche Verteilungsfunktion die beste ist. Sie schließen aus ihren Ergebnissen, dass für jeden Pegel individuell geprüft werden sollte, welche Verteilung am

besten an den vorhandenen Datensatz angepasst werden kann. Da sich beim Testen der verschiedenen Funktionen am vorhandenen Datensatz keine signifikanten Unterschiede zeigen, wird darauf verzichtet und für die Berechnung des SSI stets die Log-Logistic-Funktion verwendet. Zur Berechnung wird das R-Paket “SPEI“ verwendet.

3.2.2 Pettitt-Test

Ob in einer Zeitreihe ein Wendepunkt vorliegt, wird u.a. mit dem Pettitt-Test festgestellt, welcher von Pettitt (1979) entwickelt und von Kundzewicz and Robson (2004) zur Anwendung auf hydrologische Zeitreihen vorgeschlagen wurde. Es handelt sich um einen nicht-parametrischen Test, welcher schon in einigen hydrologischen und klimatologischen Studien angewandt wurde, um abrupte Veränderungen in Zeitreihen zu finden (Zhang and Lu, 2009; Ma et al., 2008; Mallakpour and Villarini, 2015). Mit diesem Ansatz wird nach einer Veränderung des Mittelwertes einer Verteilung in einer Zeitreihe gesucht, deren Zeitpunkt unbekannt ist. Der Test beruht auf einer Version der Mann-Whitney-Statistik $U_{t,N}$, die überprüft, ob zwei Proben $x_1, \dots, x_t$ und $x_{t+1}, \dots, x_N$ aus der gleichen Gruppe stammen. Die Teststatistik $U_{t,N}$ wird durch

$$U_{t,N} = U_{t,-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_t - x_j) \quad \text{bei } t = 2, \dots, N \quad (1)$$

berechnet. Dabei wird gezählt, wie häufig eine Probe aus der ersten Gruppe höher ist als eine Probe aus der zweiten Gruppe. Laut Pettitt (1979) ist die Nullhypothese, dass es keinen Wendepunkt gibt. Der Wendepunkt wird als

$$K_t = \text{Max}_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (2)$$

berechnet und die Signifikanz mit

$$p \cong 2\exp(-6(K_t)^2/(N^3 + N^2)) \quad (3)$$

bestimmt. Bei $p < 0,05$ wird die Nullhypothese verworfen und angenommen, dass ein Wendepunkt existiert und die Zeitreihe am Punkt t in zwei Teile eingeteilt.

3.2.3 Mann-Kendall-Test

Zur Bestimmung von Trends in Zeitreihen kann der Mann-Kendall-Test verwendet werden. Dieser nicht-parametrische Test setzt keine Normalverteilung der Daten voraus. Die Mann-Kendall-Test-Statistik S wird berechnet durch

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

mit n für die Anzahl der Datenpunkte, x_i und x_j für die Datenwerte der Jahre i und j , wobei $i < j$, und sgn der Vorzeichenfunktion

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{wenn } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{wenn } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{wenn } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Die Nullhypothese ist, dass der Erwartungswert $\mu_S = 0$. Die Varianz wird gegeben durch

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (6)$$

wobei n die Anzahl der Datenpunkte ist, m die Anzahl der identischen Datenpunkte t_i und i die Anzahl der identischen Werte (je Datenpunkt) ist. Für Datensätze $n > 10$ wird die standardisierte Teststatistik Z_S mit

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{wenn } S > 0 \\ 0 & \text{wenn } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{wenn } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

angewendet, wobei ein positiver Wert von Z_S einen ansteigenden Trend und ein negativer Wert für Z_S einen abfallenden Trend indiziert. Wenn $|Z_S| > Z_{1-\alpha/2}$ wird die Nullhypothese mit der Signifikanz α abgelehnt und ein Trend somit als signifikant festgestellt. Für die Berechnung des Mann-Kendall-Test wurde das R-Paket “trend“ verwendet.

3.3 Methodisches Vorgehen

3.3.1 Korrelation der Niederschlags- und Abflusszeitreihen

Im ersten Schritt wird die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss für die jeweils verfügbaren Zeiträume untersucht. Beide Zeitreihen werden hierfür zu Monatswerten zusammengefasst. Auf Basis dieser monatlichen Zeitreihen wird ein standardisierter Niederschlagsindex SPI bzw. Abflussindex SSI berechnet (McKee et al., 1993). Zunächst wird der Einfluss der Länge des Berechnungszeitraumes des SSI auf die Korrelation bestimmt. Dazu werden jeweils die Spearman-Rangkorrelationen zwischen dem SSI und dem SPI mit den Zeitfenstern von 1-6, 9, 12 und 24 Monaten berechnet. Folgend der Ergebnisse dieses Vergleichs wird in dieser Arbeit stets der SPI₂ verwendet (Seite 18). Durch den relativen Charakter und das Verwenden gleicher Zeitreihen, obwohl teilweise deutlich längere vorhanden sind, können Aussagen zur Korrelation der beiden Zeitreihen getroffen werden.

Da das hydrologische System im Einzugsgebiet (EZG) dabei diverse Charaktereigenschaften haben kann, ist eine reine Betrachtung der Korrelation von SSI und SPI nur bedingt

zielführend. Interessanter ist eine mögliche Veränderung der Beziehung über die Zeit. Dafür wird zunächst untersucht, wie sich die Korrelation über einen Zeitraum von 40 Jahren verändert hat. Hierzu werden alle Zeitreihen verwendet, welche über den Zeitraum von 1970 bis 2009 verfügbar sind. Hier wird sowohl für den Zeitraum 1970 - 1990 als auch für den Zeitraum ab 1990 jeweils die Korrelation von SSI und SPI berechnet. Zusätzlich wird im Folgenden dafür ein Zeitpunkt einer möglichen Veränderung im Abflussverhalten gesucht und die Korrelation PRE-WP mit der Korrelation POST-WP verglichen.

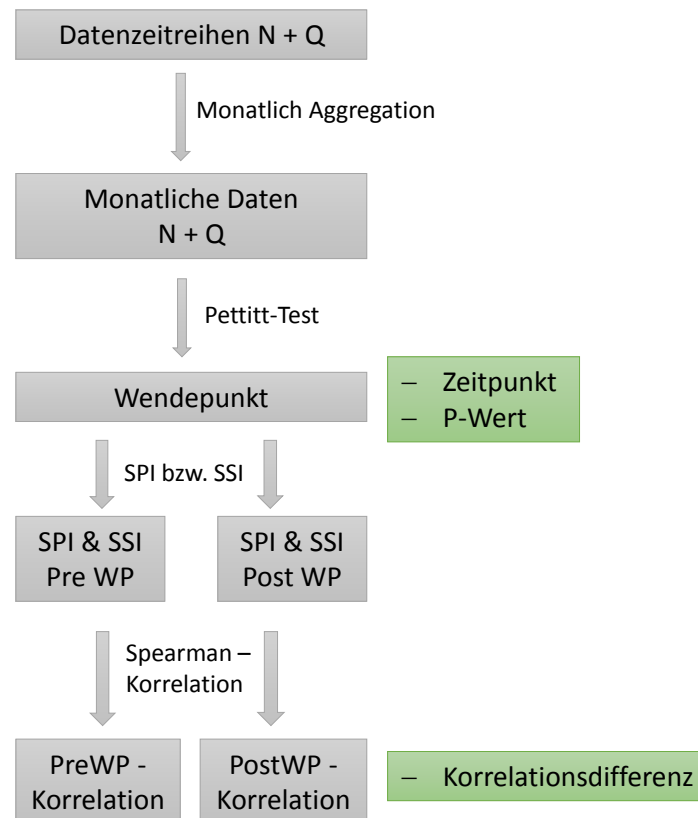


Abbildung 4 Berechnung der standardisierten Niederschlags- Abflussbeziehung. Das Flussdiagramm zeigt den Aufbau des R-Codes zur Berechnung der Korrelation von Niederschlag und Abfluss vor bzw. nach einem ermittelten Wendepunkt.

In Abbildung 4 ist schematisch dargestellt, wie die Werte der PRE-WP und POST-WP-Korrelationen zwischen P und Q berechnet werden. Zunächst werden die zu Monatswerten aggregierten Abflusszeitreihen dem “change-point-detection-test“ von Pettitt (1979) zur Ermittlung von einzelnen Wendepunkten in klimatischen oder hydrologischen Zeitreihen unterzogen. Die jeweils ermittelten Wendepunkte dienen nun als Scheidepunkte und es werden jeweils für den PRE-WP und den POST-WP getrennt voneinander der SSI und der SPI berechnet. Die Differenz der Spearman-Rangkorrelation zwischen den PRE-WP und den POST-WP dient anschließend als Maß dafür, ob ein menschlicher Einfluss vermutet werden kann.

3.3.2 Wasserbilanz

Es wird zur Untersuchung auf menschliche Beeinflussung in dieser Arbeit auf eine vereinfachte Form der Wasserbilanz zurückgegriffen. Für ein EZG gilt dabei $P = Q + ET$. In einem ersten Schritt dafür wird dafür eine Doppelsummenkurve des P und des Q gebildet. Dazu werden die jeweils komplett verfügbaren P -Daten und die Q -Daten zu hydrologischen Jahreswerten zusammengefasst. Sind in einem Jahr keine Abflussdaten verfügbar, wird es ausgelassen. Bei gleichbleibendem Abflussverhalten im EZG bleibt das Verhältnis Q/P konstant. Die Bewertung der Doppelsummenkurven werden manuell vorgenommen. Dabei werden die Kurven in 3 Kategorien eingeteilt (vgl. Abbildung 5):

1. Konstantes Verhältnis
2. Kontinuierliche Veränderung
3. Veränderung mit spezifischem Zeitpunkt

Beim 1. Fall bleibt das Verhältnis von P und Q mehr oder weniger gleich. Die Doppelsummenkurve verläuft nahe oder auf der Konstanten (in Abb. 5 die graue Linie). Im 2. Fall nimmt einer der beiden Faktoren relativ gesehen stetig zu oder ab, es bildet sich eine weiche Kurve oberhalb oder unterhalb der Konstanten. Im 3. Fall ist ein Zeitpunkt, an dem sich das Verhältnis verändert, eindeutig zu erkennen.

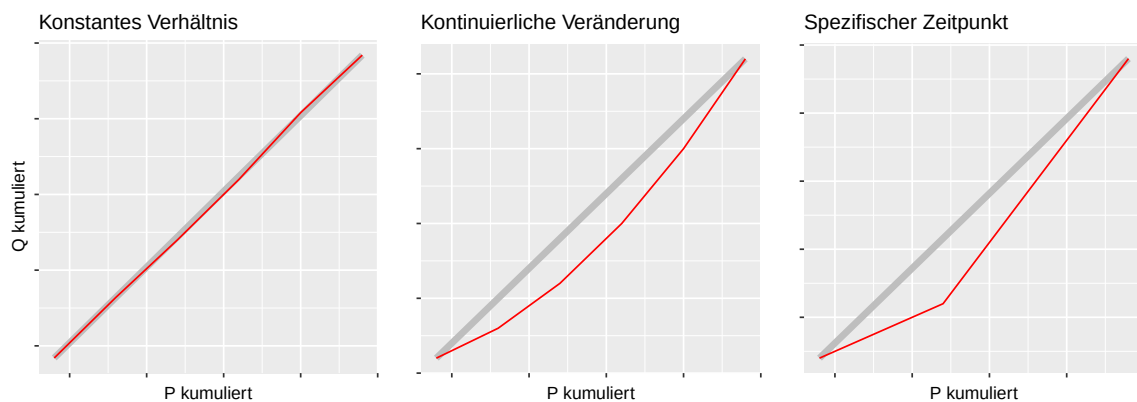


Abbildung 5 Kategorien der Doppelsummenkurven. Drei typische Kategorien der Doppelsummenkurven vereinfacht dargestellt.

3.3.3 Niedrigwasserbilanz

Um eine Aussage bezüglich Dürren treffen zu können, werden die NQ7 auf Trends untersucht, um einen ersten Eindruck zu erhalten. Dafür wird aus den Zeitreihen aus jedem hydrologischen Jahr der NQ herausgefiltert sowie das gleitende Mittel über sieben Tage berechnet und daraus wiederum der niedrigste Wert herausgesucht (NQ7). Durch die Trendanalyse der NQ7 können eindeutige Trends dargestellt werden, aber auch abrupte Veränderungen im Niedrigwasserbereich können auf anthropogene Einflüsse hinweisen.

Auf Veränderungen im Niedrigwasserbereich ist im Bezug auf Dürren anschließend ein besonderes Augenmerk zu legen.

3.3.4 Veränderung der Dürrecharakteristiken

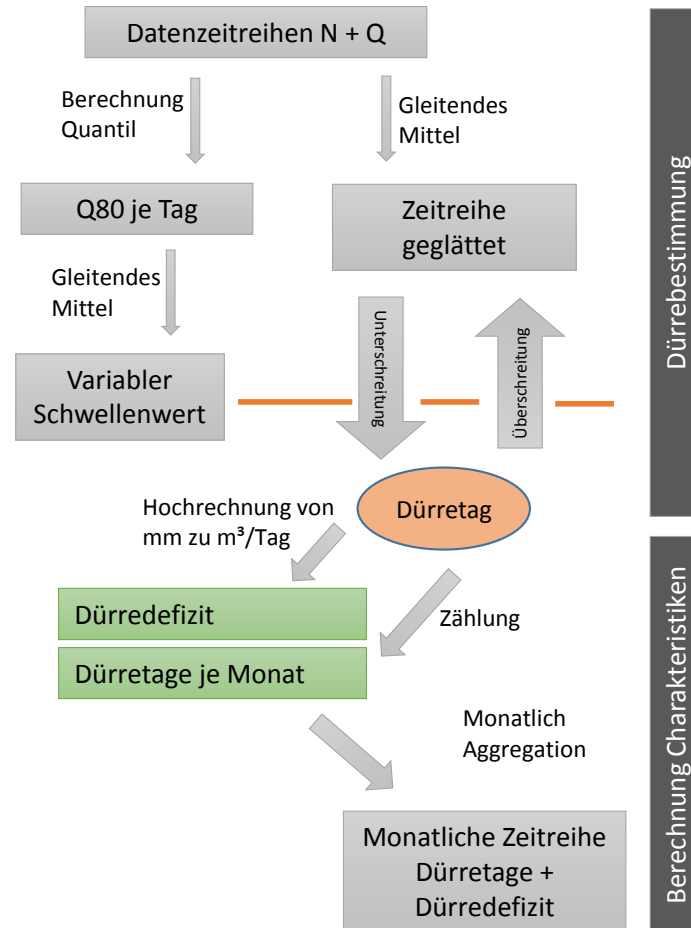


Abbildung 6 Flussdiagramm zu Berechnung der Dürrecharakteristiken. Das Flussdiagramm zeigt das Vorgehen die Dürretage bzw. das Dürredefizit im R-Code einer Zeitreihe zu berechnen.

Zur Trendberechnung der Dürrecharakteristiken werden sowohl die Anzahl der Dürretage ausgewertet als auch die Dürredefizite. Eine Dürre wird folgendermaßen definiert: Unterschreitet der Abfluss eines Pegels den des Q_{80} -Quantils, den Abfluss der in 80% der Tage überschritten wird, so ist das Gewässer in einer Dürreperiode. Es handelt sich dabei um einen variablen Schwellenwert, der für jeden Tag des Jahres einzeln vorliegt. Da kurzfristige Trockenereignisse ausgeschlossen werden sollen, wird über den Abfluss ein gleitender Mittelwert von 30 Tagen gelegt.

$$Q_i^{MA} = \frac{(Q_{i-15} + Q_{i..} + Q_{i+14})}{30} \quad (8)$$

Einzelne kürzere Phasen unterhalb des Schwellenwertes werden damit nicht als Dürreereignis

deklariert. Aus Vergleichsgründen werden die Daten der Jahre mit der höchsten Datenverfügbarkeit 1980-2009 verwendet. Über die Häufigkeitsverteilung werden die Q_{80} -Quantile jeden Jahrestages ermittelt. Um allzu große Sprünge zu vermeiden, wird auch hier ein gleitendes Mittel über 30 Tage gebildet (vgl. Gl. 1). Die Anzahl der Dürretage wird monatlich sowie jährlich aufgezeichnet. Das Dürredefizit D_{def} wird aus der Differenz des Abflusses, bestehend aus dem Tagesmittel Q in m^3/s , und dem Schwellenwert SW nach

$$D_{\text{def}} = SW - Q * 60s * 60m * 24h \quad (9)$$

berechnet.

Für beide Kennwerte wird eine Trendanalyse mit dem auf Rängen basierenden Trendtest nach Mann-Kendall (Seite 12) durchgeführt. Dazu werden die Daten monatlich zusammengefasst. Dadurch sollen voneinander abhängige Dürreperioden zusammengefasst werden, sodass innerhalb der Zeitreihe keine Autokorrelation mehr vorhanden ist. Die Ergebnisse der Trenduntersuchung werden zusammen mit den vorherigen betrachtet und bei mehreren deutlichen Anzeichen von Veränderung wird untersucht, ob ein Trend natürlich zustande kommt oder ob ein anthropogener Einfluss vorliegt.

4 Ergebnisse

4.1 Korrelation der Niederschlags- und Abflusszeitreihen

Zur Betrachtung der Korrelation von SPI und SSI wird zunächst die bestmöglich korrelierende Länge des SPI ermittelt. In Abbildung 7 ist die Entwicklung des Spearman Korrelationskoeffizienten über die verschiedenen Längen dargestellt. Die im Mittel höchste Korrelation mit einem Wert von 0,62 bildet sich zwischen dem SPI2 und dem SSI. Diese Korrelation wird im Folgenden verwendet.

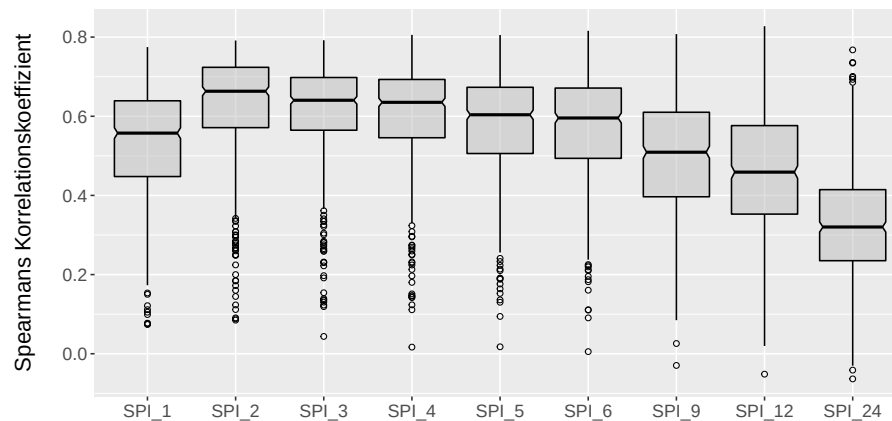


Abbildung 7 Korrelation zwischen dem SSI und dem SPI verschiedener Länge.

Die Korrelation von SPI2 und SSI bleibt nicht dauerhaft konstant. Bei dem Vergleich der Korrelationen zwischen den Zeiträumen von 1970-1990 und 1990-2014 ergeben sich häufig Verschiebungen. Die Bilanz aller Pegel mit einer Datenzeitreihe in diesem Zeitraum liegt bei einer Verschiebung von 0,02. Eine Übersicht über das uneinheitliche Bild ist in Abbildung 8 einzusehen.

In Tabelle 1 sind die Pegel aufgelistet, welche eine im Betrag höhere Veränderung der SPI2-SSI-Korrelation am Wendepunkt haben als 0,4. Das bedeutet, die Korrelationen PRE-WP und POST-WP unterscheiden sich wesentlich. Eine deutliche Verringerung des Zusammenhanges ist an den Gewässern Friedländer Fließ (-0,4), Roth (-0,74) und am Roten Main (-0,48) zu erkennen, eine Erhöhung ist an der Unstrut (+0,43) und an der Bever (+0,41) festzustellen.

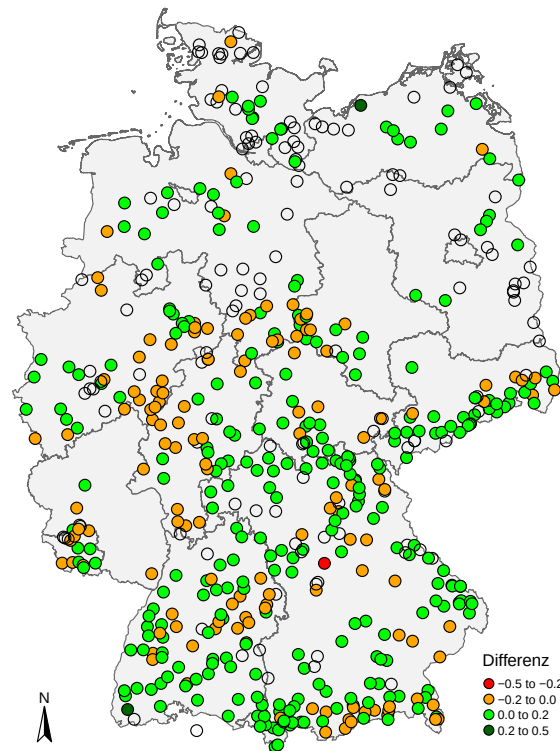


Abbildung 8 Vergleich der Korrelationen von 1970 bis 2014. Leerer Kreis → Datenreihe zu kurz; negativ → rot, positiv → grün

4.2 Wasserbilanz

Bei der Veränderung der Doppelsummenkurve gibt es eine größere Anzahl verschiedene Muster, als in der Übersicht auf Seite 15 angenommen. Eine Auswahl der auffälligsten Doppelsummenkurven ist in Abbildung 10 dargestellt. Beim Pegel des Biberbaches in Thalwinkel (Grafik A in Abb. 10) nimmt der Abfluss seit Beginn der 90er Jahre ab, bleibt danach aber stabil. Der Pegel Neundorf der Gottleuba (F) weist einen ähnlichen Verlauf auf, allerdings ist der Zeitpunkt der Veränderung nicht genau bestimmbar. Beim Roten Main gibt es ab dem Jahr 2010 einen deutlichen Anstieg des Abflusses (B). Nicht ganz so deutlich ist die Abweichung beim Dalkebach in Avenwedde (C). Hier gibt es Anfang der 80er Jahre eine Anomalie im P-Q-Verhältnis. Der ab dem Jahr 1993 stark zunehmende Abfluss der Roth am Pegel Bleiche (D) im Verhältnis zum Q. Es handelt sich hierbei um den schärfsten Umbruch aller Pegel. Die Doppelsummenkurve der Rugenwedelsau bei Wendlohe hat einen Verlauf, welcher in der Form nicht erwartet wurde. Hier verändert sich das P-Q-Verhältnis zweimal. Über die Jahre von 1985 bis 1998 ist der Abfluss geringer als in den Zeiträumen davor und danach.

4.3 Veränderung des Niedrigwassers

Bei der Veränderung des NQ7 ist kein eindeutiger Trend über alle Pegel festzustellen. Betrachtet man das Histogramm aller Pegel, deren NQ7 das Signifikanzniveau von 0,01

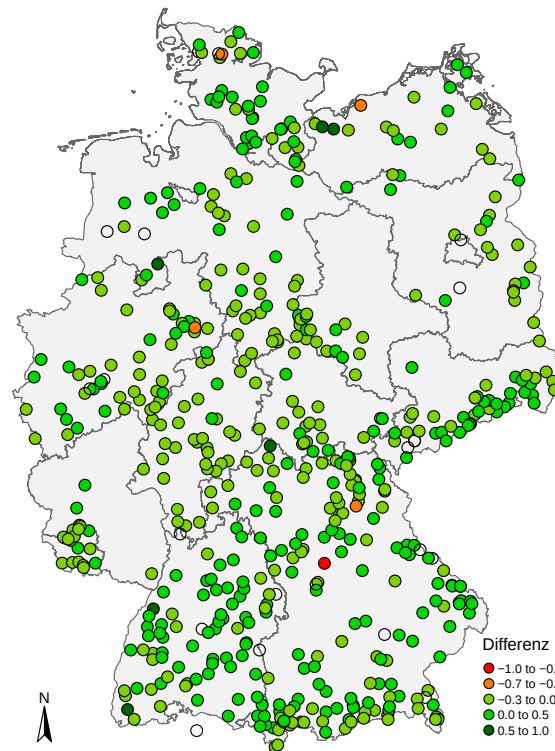


Abbildung 9 .

Vergleich der Korrelationen vor dem Wendepunkt und danach. Leerer Kreis → Datenreihe zu kurz; negativ → rot, positiv → grün

unterschreitet, ist dennoch eine Gewichtung ins negative zu erkennen. Der Mittelwert von Kendalls Tau aller Pegel liegt bei -0,035. In Abbildung 11 ist die Entwicklung der NQ7 im Überblick abgebildet. Starke Muster, wie etwa ein Nord-/Südgradient oder eine höhenbezogene Wertveränderung, sind nicht erkennbar.

4.4 Veränderung der Dürrecharakteristiken

Mehrheitlich ist in Deutschland ein Trend zu verstärkten Dürreperioden erkennbar. Sowohl das Dürredefizit als auch die Anzahl der als Dürretage gewerteten Tage ist deutlich häufiger angestiegen als abgefallen. Viele Pegel haben keine signifikante Trendrichtung, wie in Abbildungen 12 und 13 erkennbar ist. Sowohl bei Defizit als auch bei den Dürretagen gibt es vier Pegel (vgl. Tabelle 2), welche einen der breiten Masse gegenläufigen Trend aufweisen:

- Der Pegel Nordheim vor der Rhön der Streu in Bayern,
- Der Pegel Hasselfelde der Hassel in Sachsen-Anhalt,
- Der Pegel Überherrn der Bist im Saarland,
- Der Pegel Bautzen der Spree in Sachsen.

Tabelle 1 Übersicht der Flüsse mit einer Differenz der PRE-WP- und POST-WP-Korrelation $> 0,4$ bzw. $< -0,4$ und einem P-Wert des Pettitt-Tests $< 0,05$

ID	Fluss	Messstelle	Sprung	Differenz
Pegel00096	Roter Main	Creußen	2005-11-01	-0.48
Pegel00097	Roth	Roth Bleiche	1993-11-01	-0.74
Pegel00516	Friedlander Fließ	Friedland		
		Panzerbrücke	1996-10-01	-0.40
Pegel00291	Unstrut	Ammern	1956-02-01	0.43
Pegel00551	Bever	Reinhagensbever	1998-06-01	0.41

Bei den ansteigenden Werten dagegen gibt es keine extremen Ausreißer. Hier sind die Pegel Roth/Bleiche der Roth in Bayern, der Pegel Pannmühle der Schwalm in NRW, die Pegel Bad Bramstedt der Schmalfelder Au und der Pegel Wendlohe der Rugenwedelsau in Schleswig-Holstein sowie der Pegel Georgenthal 1 der Apfelstädt in Thüringen am stärksten. Hierbei handelt es sich nur um die Pegel, deren Signifikanzniveau bei Mann-Kendall-Test $< 0,05$ ist.

Tabelle 2 Liste der Pegel mit signifikant negativer Entwicklung der Dürredefizite sowie die fünf am stärksten ansteigenden Defizite nach Kendalls-Tau-Werten

Neue_ID	Flussname	Messstellename	Land	Tau	P_Wert
Abnehmend					
Pegel00125	Streu	Nordheim	Bayern	-0.43	0.00
Pegel00234	Hassel	Hasselfelde	Sachsen-Anh.	-0.30	0.00
Pegel00239	Bist	Überherrn	Saarland	-0.26	0.01
Pegel00540	Spree	Bautzen	Sachsen	-0.21	0.03
Zunehmend					
Pegel00097	Roth	Roth Bleiche	Bayern	0.49	0.00
Pegel00211	Schwalm	Pannmühle	NRW	0.50	0.00
Pegel00252	Schmalfelder Au	Bad Bramstedt	SH	0.52	0.00
Pegel00282	Rugenwedelsau	Wendlohe	SH	0.47	0.00
Pegel00295	Apfelstädt	Georgenthal1	Thüringen	0.47	0.00

Tabelle 3 Synthesetabelle der Untersuchungen. Aufgelistet sind die Pegel mit Pegel_ID und Gewässername, bei welchen eine Veränderung des Abflussverhaltens (P-Q-Doppelsummenkurve, Wendepunkte Korrelation SSI SPI2) oder und im Niedrigwasserbereich bzw. der Dürrecharakteristiken (Kendalls Tau) vorliegt

	Neue_ID	Gewässer	CumSum P/Q	WP	Trend NQ7	Trend Dürretage	Trend Dürredefizit
1	Pegel00006	Altmühl				0.35	
2	Pegel00012	Aurach				0.39	0.39
3	Pegel00014	Bibert	2				
4	Pegel00025	Euzenauer Bach	1				
5	Pegel00026	Felchbach	1		-0.31		
6	Pegel00038	Gründlach	1				
7	Pegel00044	Haselbach	1		0.34		
8	Pegel00085	Partnach	1				
9	Pegel00087	Prien				0.45	0.44
10	Pegel00092	Rißbach	1		0.26		
11	Pegel00094	Rosenbach	1			0.37	0.37
12	Pegel00096	Roter Main	2	2005	0.30		
13	Pegel00097	Roth	2	1993		0.48	0.49
14	Pegel00099	Rottach				0.36	0.35
15	Pegel00101	Röden	1		0.33		
16	Pegel00103	Sagenbach	1				
17	Pegel00125	Streu				-0.43	-0.43
18	Pegel00127	Tauber				0.36	0.37
19	Pegel00131	Trebgast	1				
20	Pegel00143	Weißer Traun	1				
21	Pegel00144	Weißer Main	1		0.33		
22	Pegel00150	Starzlach	1				
23	Pegel00163	Wallensteingraben	1				
24	Pegel00165	Nebel	1		0.25		
25	Pegel00175	Augraben	1				
26	Pegel00178	Meynbach	1				
27	Pegel00182	Erft	1				
28	Pegel00183	Dalkebach	1				
29	Pegel00184	Vechte					0.36
30	Pegel00188	Rotbach	1				
31	Pegel00190	Dinkel				0.36	0.36
32	Pegel00191	Volme				0.42	0.42
33	Pegel00196	Wapelbach				0.38	0.38

	Neue_ID	Gewässer	CumSum P/Q	WP	Trend NQ7	Trend Dürretage	Trend Dürredefizit
34	Pegel00211	Schwalm				0.50	0.50
35	Pegel00217	Steinfurter Aa				0.36	0.38
36	Pegel00223	Thyra	1				
37	Pegel00224	Leine	1		-0.32		
38	Pegel00227	Biberbach	2		-0.27		
39	Pegel00230	Eine	2				
40	Pegel00234	Hassel	2			-0.30	-0.30
41	Pegel00237	Zillierbach	2				
42	Pegel00239	Bist	2		0.33	-0.26	-0.26
43	Pegel00241	Fischbach	1		0.40		
44	Pegel00244	Würzbach	2		0.31		
45	Pegel00252	Schmalfelder Au				0.52	0.52
46	Pegel00270	Beste	1				
47	Pegel00282	Rugenwedelsau	2			0.47	0.47
48	Pegel00288	Wisenta	1				
49	Pegel00292	Wilde Gera	1		-0.29		
50	Pegel00293	Zahme Gera	1				
51	Pegel00295	Apfelstädt				0.48	0.47
52	Pegel00301	Nahe	1				
53	Pegel00303	Schmalkalde	1				
54	Pegel00304	Hörsel	1				
55	Pegel00323	Kleebach	1				
56	Pegel00324	Dill				0.38	0.37
57	Pegel00328	Aar				0.38	0.38
58	Pegel00354	Acher	2				
59	Pegel00364	Brenz					0.35
60	Pegel00390	Kinzig	2				
61	Pegel00399	Krähenbach	1				
62	Pegel00403	Starzel				0.39	0.38
64	Pegel00405	Erlenbach	2				
65	Pegel00406	Prim				0.37	0.38
66	Pegel00410	Röhlinger Sehta	1				
67	Pegel00435	Mühlenbach				0.38	0.38
68	Pegel00471	Seidewitz	2				
69	Pegel00494	Spree	1				
70	Pegel00496	Wuischker Wasser	1				
71	Pegel00504	Klinge	1				

		CumSum		Trend		Trend	Trend
Neue_ID		Gewässer	P/Q	WP	NQ7	Dürretage	Dürredefizit
72	Pegel00505	Nettelgraben	2	1996		-0.34	
74	Pegel00516	Friedlander Fließ	1				
75	Pegel00519	Obere Malxe	2				
76	Pegel00521	Stepenitz	2				
77	Pegel00540	Spree				-0.21	
78	Pegel00541	Wilde Weißeritz	2				
79	Pegel00544	Gottleuba	2				
80	Pegel00545	Zwickauer Mulde	1				
81	Pegel00547	Pressnitz	1				
82	Pegel00552	Bever				0.36	0.35

Die Tabelle 3 führt die Ergebnisse der angewandten Methoden zusammen. Dort sind die Gewässer mit der in der Arbeit verwendeten ID aufgeführt, Dazu die Analyse der Doppelsummenkurve (1 steht für eine sichtbare Anomalie, 2 für eine eindeutige Abweichung). Des weiteren sind die Ergebnisse der Wendepunktanalyse, der P-Q-Korrelation, die Trendstärke des NQ7 sowie die Veränderung der Dürrecharakteristiken aufgelistet.

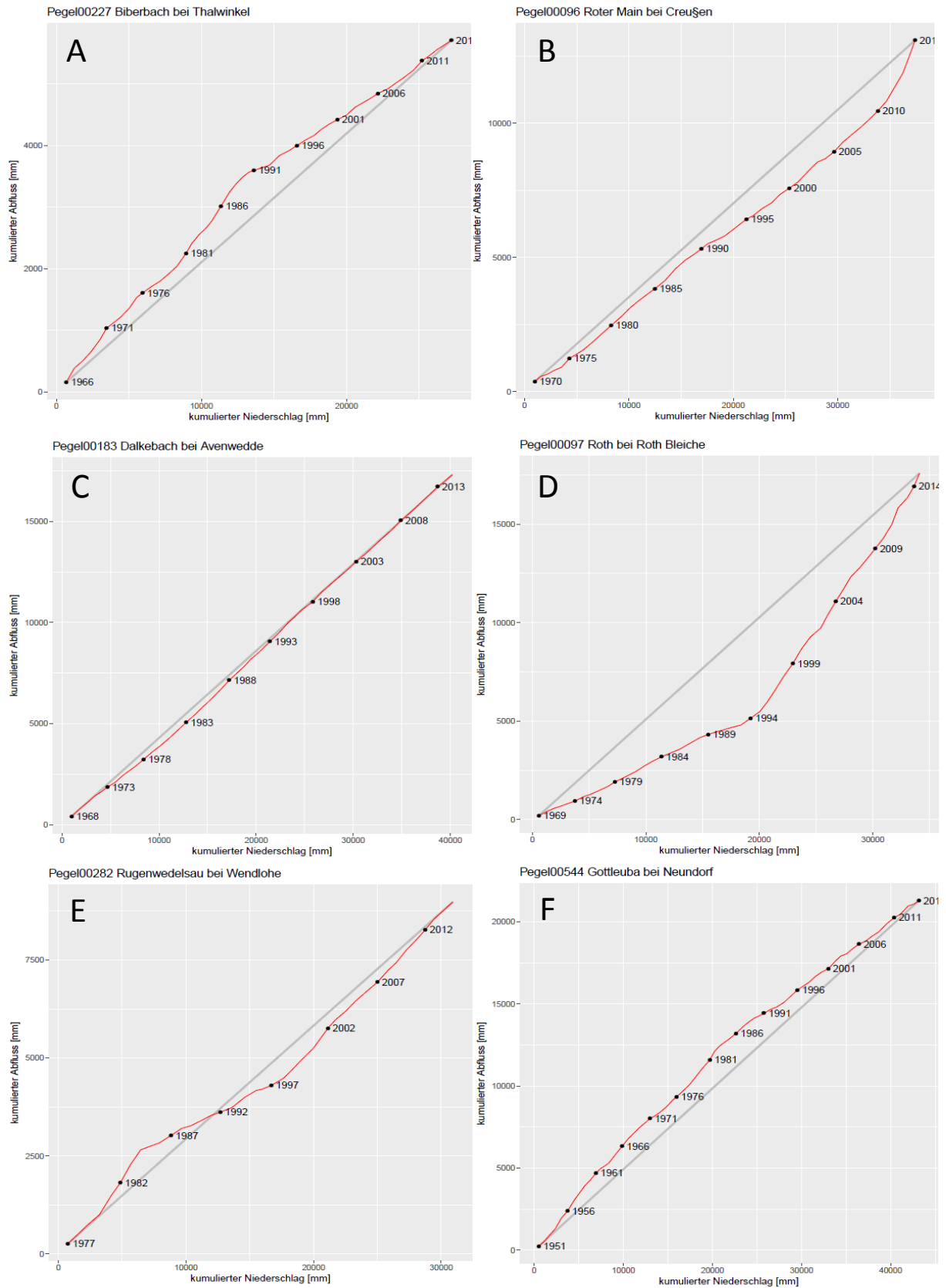


Abbildung 10 Beispiele kumulierter Doppelsummenkurven. Ausgewählte Doppelsummenkurven aus P und Q. A: Biberbach (Thalwinkel); B: Roter Main (Creußen); C: Dalkebach (Avenwedde); D: Roth (Roth Bleiche); E: Rugenwedelsau (Wendlohe); F: Gottleuba (Neundorf).

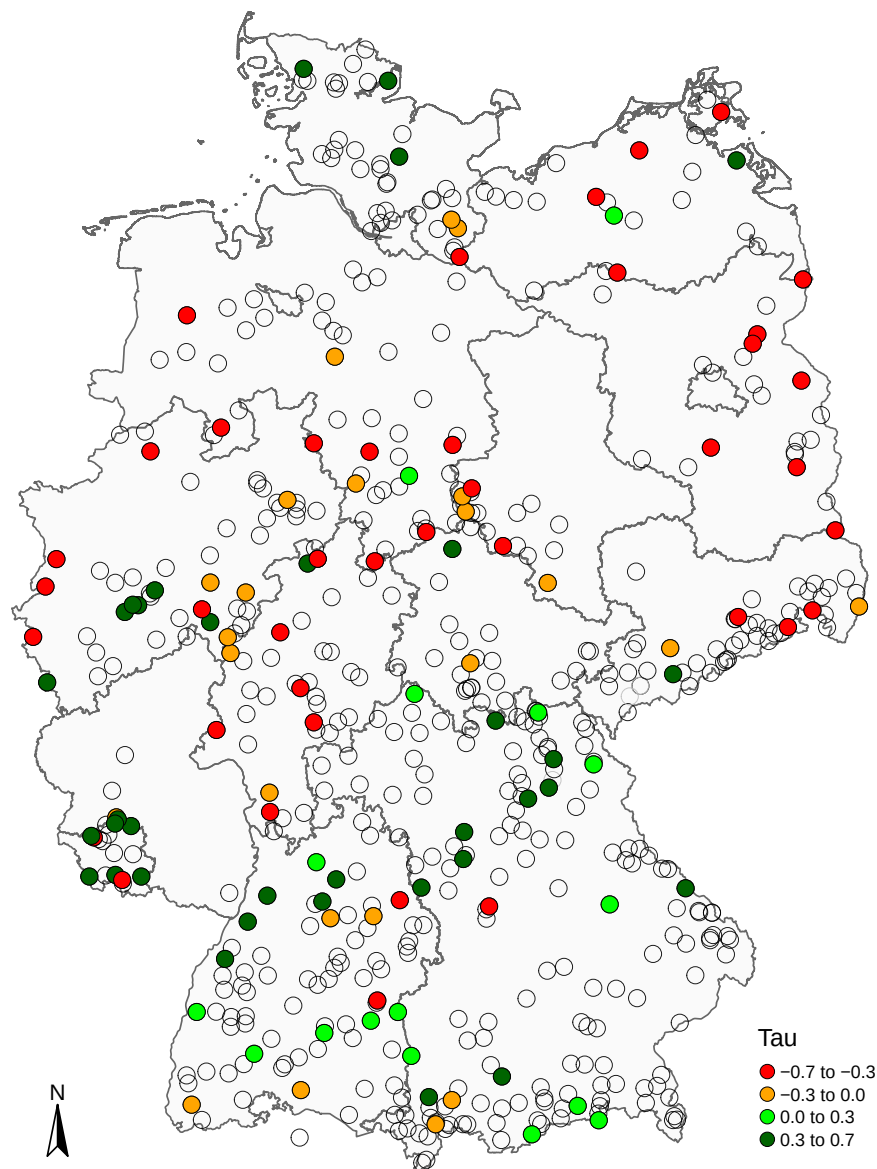


Abbildung 11 Trend der NQ7. Abgebildet sind Kendalls Tau der Pegel, bei welchen das Signifikanzniveau von 0,01 unterschritten wurde.

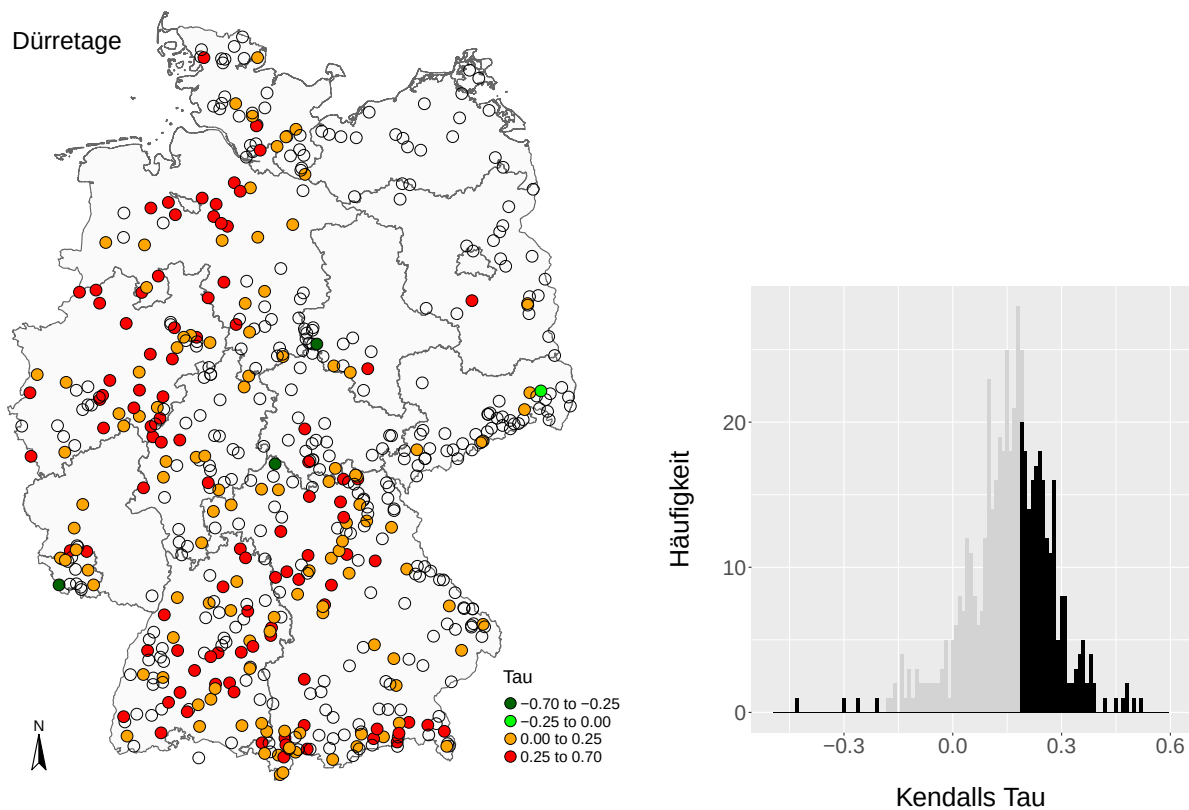


Abbildung 12 Trend der Dürretage. Abgebildet sind Kendalls Tau des Mann-Kendall-Tests auf Trendeigenschaften der Pegel. Links ist der Trend der Anzahl der Dürretage dargestellt: rot → zunehmend, grün → abnehmend, leer → nicht signifikant. Rechts die Häufigkeitsverteilung von Kendalls Tau.

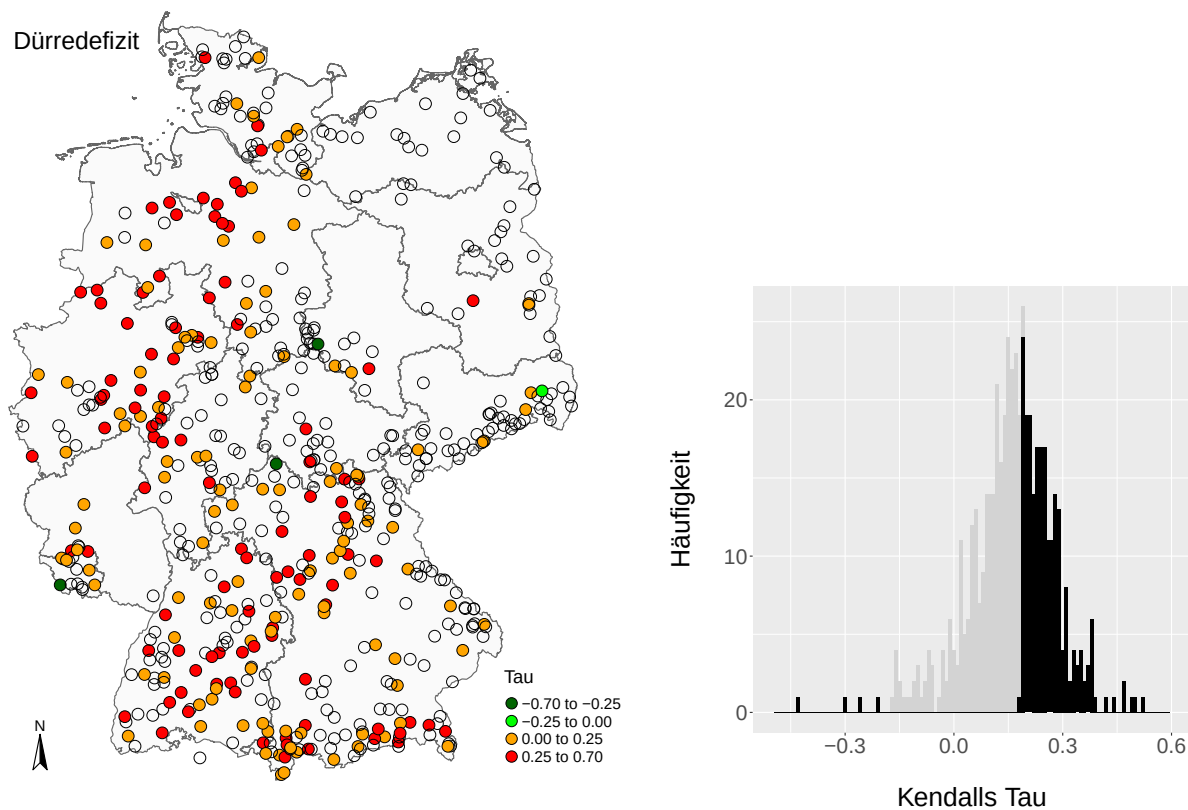


Abbildung 13 Trend der Dürredefizite. Abgebildet sind Kendalls Tau des Mann-Kendall-Tests auf Trendeigenschaften der Pegel. Links ist Kendalls Tau der Dürredefizite dargestellt, rot → zunehmend, grün → abnehmend, leer → nicht signifikant. Rechts ist das Histogramm der Werte von Kendalls Tau.

5 Diskussion

5.1 Korrelation der Niederschlags- und Abflusszeitreihen

Bei der Untersuchung der SPI2-SSI-Korrelation wurde das allgemeine Verhalten des Abflusses, also nicht speziell im Niedrigwasserbereich, betrachtet. Grundsätzlich kann die Korrelation bei kleinen, einfach aufgebauten hydrologischen Systemen in einem EZG leichter nachvollzogen werden. Je größer und komplexer ein EZG, desto mehr verschiebt sich der Abfluss, bzw. verändert sich das Abflussregime im Verhältnis zum P. Wenn ein EZG schlagartig andere Abflusseigenschaften aufweist, ist eine Beeinflussung durch den Menschen meist die erste Vermutung. Es ist aber theoretisch möglich, dass natürliche Ereignisse wie Flussbettumlagerungen, Vegetationsveränderungen durch Waldbrände oder Windwurf oder das Abgraben eines EZG durch einen anderen Fluss Ursachen für eine abrupte Änderung sind.

In Tabelle 1 sind die Gewässer aufgeführt, welche nach dem Pettitt-Test einen Sprung in der SPI2-SSI-Korrelation aufweisen. Dieser Sprung muss nicht grundsätzlich einen Einfluss auf das Auftreten von Dürren haben. Sowohl der SPI2 als auch der SSI sind keine Dürrespezifischen Indizes, sondern bilden sowohl überdurchschnittlich trockene als auch überdurchschnittlich feuchte Bedingungen ab (McKee et al., 1993; Mishra and Singh, 2010). Die Veränderung SPI2-SSI-Korrelation kann allerdings auch Auswirkungen auf die Entstehung und die Entwicklung von Dürren haben. Für die zweite Hypothese, dass sich Dürren durch Talsperren und deren Abgaberegeln verringern können, können die ermittelten Ergebnisse der Wendepunkte in Betracht gezogen werden.

Die schleichende Veränderung durch langsam steigende Wasserentnahmen oder ein sich klimabedingt wandelndes Niederschlagsregime können tendenziell eher bei der Betrachtung der Dekaden abgelesen werden. Da sich im Falle eines sich langsam verändernden Q oder P nicht zwangsläufig die Korrelation der beiden verändert, lassen sich kontinuierliche Beeinflussungen nicht nachweisen. Auch anthropogene Einflüsse, die dauerhaft über den gesamten Zeitraum der Datenreihe vorhanden sind, lassen sich nicht detektieren. Die Zeitreihen als Datengrundlage sind dafür meistens zu kurz.

5.2 Wasserbilanz

Die direkte Analyse des P und des Q im Verhältnis zueinander bietet ebenfalls keine dürrespezifischen Antworten auf die Frage einer menschlichen Beeinflussung. Das komplette Regime betreffende Aussagen können auch hier getroffen werden. In Abbildung 10 auf Seite 25 lässt sich das an Hand der Beispiele gut erkennen. Die Grafik A, der Pegel Thalwinkel des Biberbaches und der Pegel in Grafik F, der Pegel Neundorf der Gottleuba, haben ein sich über die Jahre veränderndes Verhältnis von P zu Q. Bei der Gottleuba scheint sich das Verschieben hin zu mehr P allerdings gradueller zu vollziehen, während

man beim Biberbach eine einschneidende Veränderung auf Anfang der 90er Jahre datieren kann. Die Steigung der Doppelsummenkurve lässt aber bei beiden Pegeln die Schlussfolgerung zu, dass entweder bei gleichem P weniger Q oder bei zunehmendem P genauso viel Q gebildet wird.

Die Diagramme B und D auf Seite 25 weisen beide auf einen ansteigenden Q an einem bestimmten Zeitpunkt hin (Kategorie 3). Dabei ist bei der Roth am Pegel Bleiche dieser Anstieg noch eindeutiger zu erkennen als beim Roten Main am Pegel Creußen. Beim Pegel Avenwedde des Dalkenbachs (C) ist ebenfalls eine leichte Abweichung zu erkennen. Ab Beginn der 80er Jahre steigt der Abfluss wieder an und erreicht das ursprüngliche P - Q -Verhältnis.

Der Pegel der Rugenwedelsau bei Wendlohe (E) hat von 1985 bis 1998 eine andere Steigung der Doppelsummenkurve als davor und danach. In einem Zeitraum von 13 Jahren wurde aus dem P weniger Q gebildet. Ob sich diese Veränderungen der Doppelsummenkurven auch auf die Dürreperioden auswirken, kann daraus an dieser Stelle nicht geschlossen werden. In der Tabelle 3 sind zusätzlich die weiteren Pegel aufgelistet, bei welchen eine Veränderung festgestellt werden konnte.

5.3 Niedrigwasserbilanz

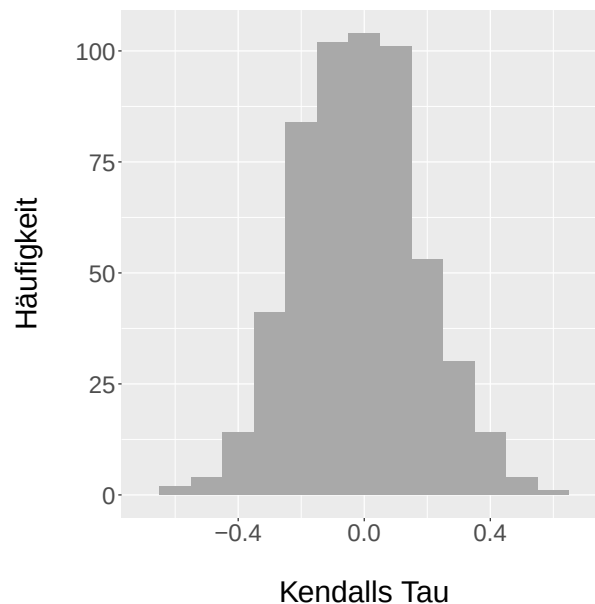


Abbildung 14 Histogramm der Trends des NQ7. Häufigkeit von Kendalls Tau des Mann-Kendall-Tests auf Trendeigenschaften der NQ7-Zeitreihen.

Bei der Niedrigwasserbilanz gibt es zwei verschiedene Trendrichtungen. Dass die Mehrheit der Pegel einen tendenziell abfallenden NQ7 über die Jahre hat, stimmt mit der Hypothese überein, dass zunehmende Wassernutzung und möglicherweise auch geringere Niederschläge mit ansteigenden Temperaturen gerade in Trockenzeiten für weniger Ab-

fluss sorgen. Allerdings ist der Trend nicht so eindeutig, wie man es bei der Hypothese erwarten könnte. In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass er leicht in die negative Richtung geht, wobei hier auch die als nicht signifikant eingestuft Werte mit dargestellt sind.

5.4 Veränderung der Dürrecharakteristiken

Bei den Veränderungen der Dürrecharakteristiken ergibt sich ein einheitliches Bild der Dürretage und der Dürredefizite. Der Zusammenhang ist durch ein vermehrtes Auftreten von niederschlagsarmen Perioden im Sommer (IPCC, 2014) gut zu erklären. Bei einem längeren Unterschreiten des Q80 als Schwellenwert wird auch ein höheres Defizit akkumuliert. Gegen den allgemeinen Trend stehen die Gewässer Streu (Nordheim vor der Rhön), Hassel (Hasselfelde), Bist (Überherrn) und Spree (Bautzen). Sie weisen bei der Trendanalyse nach Mann-Kendall einen negativen Wert auf, d.h. es gibt eine Abnahme von sowohl Dürretagen als auch dem Dürredefizit.

5.5 Synthese der Ergebnisse

5.5.1 Roth

Die Roth ist ein Fluss im gleichnamigen Landkreis Roth südlich von Nürnberg in Bayern. Der hier betrachtete Pegel in Roth Bleiche befindet sich kurz vor der Mündung in die Rednitz. Diese fließt wiederum über die Regnitz, den Main und den Rhein in die Nordsee.

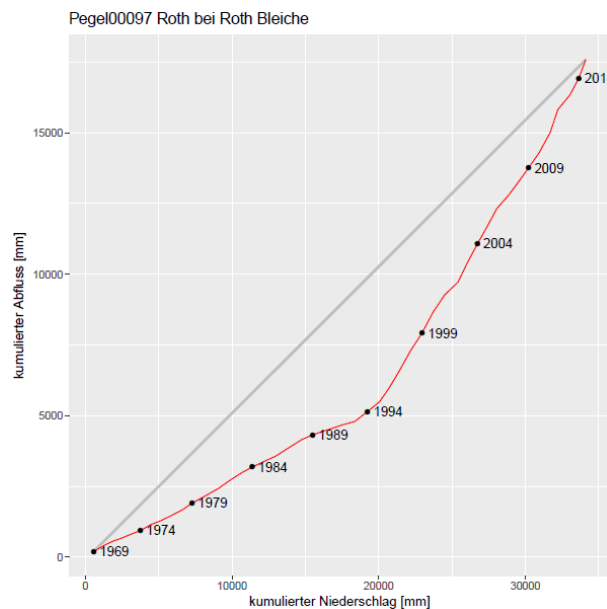


Abbildung 15 Doppelsummenkurve der Roth. Gegeneinander aufgetragen sind die aufsummierten P- und Q-Daten.

Die Veränderung des Abflussverhaltens der Roth am Pegel Bleiche ist in der Doppelsummenkurve von P und Q gut zu erkennen. Schaut man sich die realen Abflussdaten an (Abb. 16), so ist auch hier eine deutliche Zunahme des Abflusses sichtbar. Zunächst

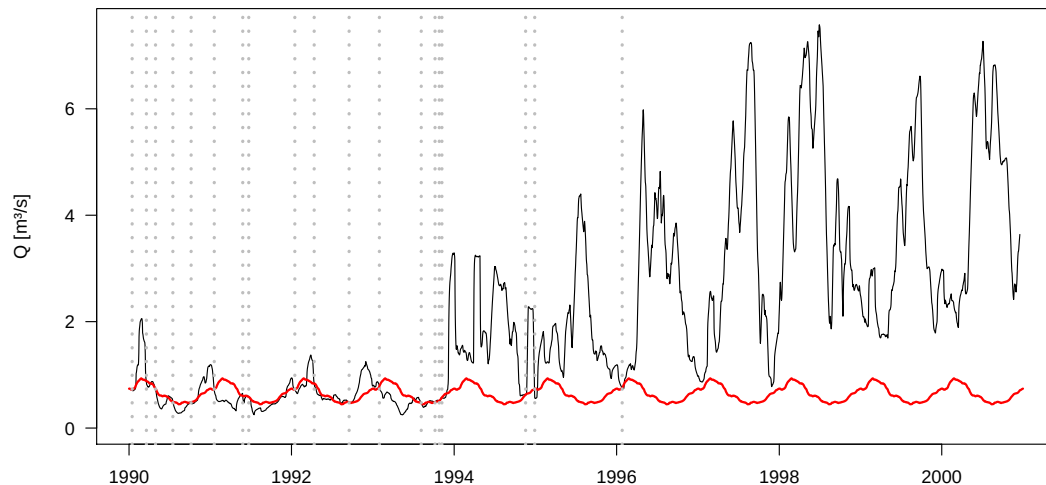


Abbildung 16 Abfluss der Roth 1990-2000. Der Abfluss der Roth bei Bleiche. Die rote Linie markiert den Schwellenwert Q_{80} , die senkrechten gepunkteten Linien das Unterschreiten dieser durch den Q .

steigt der Abfluss im Jahr 1994 deutlich an. Auch der Schwellenwert des Q_{80} , welcher hier zur Bestimmung von Dürretagen dient, wird nach 1996 nicht mehr unterschritten. Laut Tabelle 3 ist eine deutliche Abnahme der Dürretage und Dürredefizite vorhanden.

Grund für diese deutliche Anhebung des Q ist die Errichtung des Rothsees, ein Stausee, welcher im Verbund mit anderen in der Region von 1971 bis 2000 geplant und gebaut wurde. Ziel ist es laut Wasserwirtschaftsamt Ansbach, (2014) die wasserwirtschaftlichen Bedingungen im Main-Donau-Gebiet zu verbessern. Konkret bedeutet dies eine Abgabe von Stauwasser über die Roth in das Flusssystem Regnitz-Main zur Aufhöhung von Niedrigwasser. Im Jahr 2015 wurden insgesamt gut 116 Mio m^3 Wasser über den Rothsee aus dem Donau-EZG in das Main-EZG übergeleitet.

5.5.2 Prims/Blies

Ähnlich wie bei der Roth wurde auch im Saarland 1982 ein Stausee errichtet, um das regionale Wassermanagement zu verändern. Die Primstalsperre staut das Wasser von der Prims und vom Allbach. Das aufgestaute Wasser wird genutzt, um den Pegel der Blies im Niedrigwasserfall zu erhöhen. Dies dient dazu, dem Steinkohlekraftwerk Bexbach auch in Trockenperioden den Betrieb zu ermöglichen. In Abbildung 17 kann man sehr gut erkennen, dass der Schwellenwert, der hier zur Definition von Dürretagen angewandt wurde, nach 1980 nur noch selten unterschritten wird.

5.5.3 Roter Main und Rugenwedelsau

Der Pegel des Roten Mains weist einen deutlichen Anstieg des NQ_7 auf. Allerdings handelt es sich hierbei nur um einen scheinbaren Anstieg, da Auflandungen im Pegelbereich für

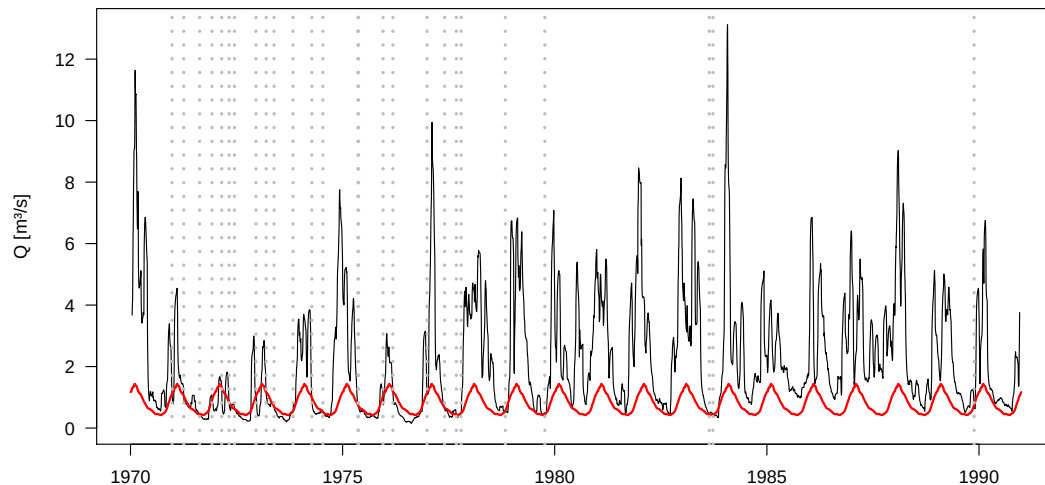


Abbildung 17 Abfluss der 1990-2000. Der Abfluss der Blies bei Ottweiler. Die rote Linie markiert den Schwellenwert Q_{80} , die senkrechten gepunkteten Linien das Unterschreiten dieser durch den Q .

eine Erhöhung des Abflusses gesorgt haben. Im Falle der Rugenwedelsau bei Wendlohe konnte keine Ursache für die zeitweilige Veränderung des Abflusses gefunden werden. Da der Pegel in Schleswig Holstein nahe am Flughafen Hamburg liegt, kann hier nur gemutmaßt werden. Eine Änderung im Entwässerungssystem des Flughafens könnte hier ein Grund sein. Es gab in den 80er Jahren Ausbaupläne, die allerdings nie in die Tat umgesetzt wurden.

5.5.4 Menschlicher Einfluss durch Talsperren

In Deutschland scheint sich zumindest in einigen Beispielen die Hypothese zu bestätigen, dass durch Niedrigwassermanagement die Dürren in hydrologischen Systemen ein Stück weit ausgeglichen werden. Dies passiert bei manchen Talsperren aus ökologischen Gründen (vgl. Bayern), oftmals aber aus ökonomischen Gründen, wie dem Erhalt von Kraftwerksleistung. Veränderungen dahingehend, dass z.B. für Bewässerung entnommenes Wasser unterhalb für verminderten Niedrigwasserabfluss sorgt, konnte nicht nachgewiesen werden. Bei einer Studie von López-Moreno et al. (2009) in Spanien und Portugal konnte dieser Effekt gezeigt werden. Die Ergebnisse der Blies und der Roth stimmen dagegen eher mit den Erkenntnissen von Rangelcroft et al. (2016) überein, auch wenn bei dieser Studie keine Überleitung in ein anderes Gewässersystem stattfand, sondern dieses Management intern stattfand.

Beim Einfluss des Menschen auf Dürren durch Talsperren spielt immer auch der Zweck des Reservoirs eine Rolle. Dabei gibt es immer den grundsätzlichen Interessenskonflikt zwischen den wirtschaftlichen Zielen des Betreibers, die in Trinkwassergewinnung oder Energiegewinnung gesehen werden können, und dem Nutzen als Hochwasserstauraum

bzw. als Reserve für Niedrigwasserzeiten. Bei größeren Stauseen kann auch noch ein touristisches Interesse hinzukommen. Di Baldassarre et al. (2017) zeigen den Konflikt zwischen Hochwasser- und Dürrefokussiertem Reservoirmanagement mit einem Beispiel aus Australien sehr gut auf: In den 1970er Jahren wurde dort ein Reservoir zur Hochwasserregulierung gebaut. In der Jahrtausenddürre (2001-2009) wurden die Nutzungsregeln dahingehend verändert, dass es nun, um der Dürre ausgleichend entgegen zu wirken, als Speicher zum Dürreausgleich genutzt wurde. Deswegen hat man die Stauziele erhöht. Dadurch konnte bei einem Hochwasserereignis im Jahr 2011 weniger Wasser zurückgehalten werden, wodurch es zu unerwartet hohen Schäden kam. Hinzu kommt noch, dass die Bevölkerung sich aufgrund des Reservoirs besonders sicher fühlte und aus diesem Grund die Gefahren nicht mehr präsent waren.

6 Schlussfolgerung und Fazit

Die Gefahr, die durch Dürren direkt und indirekt für den Menschen und seine Umwelt besteht, ist nicht so eindrücklich, wie die von kurzfristigen Ereignissen, wie z.B. Hochwasser. Aber durch lang anhaltende Dürreperioden, die bis zu Jahrzehnte andauern können, werden auch hohe ökonomische Schäden verursacht. Die Entstehung und Fortpflanzung von Dürren durch das hydrologische System sind deshalb in den letzten Jahren immer stärker in den Blickpunkt der hydrologischen Forschung gerückt. Was man besser kennt, kann man leichter einschätzen. Warnungen und vorbeugende Maßnahmen lassen sich verbessern, direkte Folgen besser abmildern. Gerade weil viele Studien von einem weiteren Anstieg der hydrologischen Extreme (u.a. von der Zunahme von Dürren) ausgehen, speziell in Süd- und Mitteleuropa.

Der menschliche Einfluss spielt dabei eine immer wichtigere Rolle. Nicht nur auf den anthropogenen Klimawandel bezogen, sondern auch auf den steigenden Wasserbedarf für eine wachsende Weltbevölkerung. In Europa sind größtenteils Studien in den Regionen gemacht worden, in welchen das Thema Dürren schon weitaus länger im Fokus ist. In Deutschland beschäftigt man sich im größeren Stil vor allem seit dem Hitzesommer 2003 stärker mit der Thematik. Der anthropogene Einfluss auf hydrologische Dürren ist dabei noch nicht häufig untersucht worden.

Diesen Einfluss genauer zu definieren war das Ziel dieser Arbeit, bei der folgende Hypothesen untersucht wurden:

1. Hydrologische Dürren in Deutschland werden grundsätzlich durch anthropogene Einflüsse verstärkt.
2. Das Aufstauen von Flüssen durch Talsperren vermindert die Auswirkungen von Dürren auf den Abfluss als Folge von Niedrigwassermanagement.

Dabei wurde mithilfe des Standardized Precipitation Index und der Korrelation dieses Index mit dem Standardized Streamflow Index sowie der Wasserbilanz versucht, anthropogene Einflüsse auf den Abfluss zu finden. Anhand der Entwicklung der Anzahl der Dürretage und der Defizite einer Dürre wurde versucht, diesen Einfluss speziell auf die Dürreperioden darzustellen.

Die erste Hypothese konnte nicht widerlegt werden. Der Trend geht bei den meisten Pegeln tatsächlich hin dazu, dass die Dürreperioden länger werden und die Defizite dementsprechend zunehmen. Hierbei ist allerdings nicht klar, ob es tatsächlich der menschliche Einfluss ist, der für diesen Trend sorgt, oder ob die Veränderungen im Rahmen der natürlichen Klimaschwankungen liegen. Beeinflussungen, die schon länger andauern als die Zeitreihen zur Verfügung stehen, konnten nicht mit einbezogen werden. Die zweite Hypothese konnte in einigen wenigen Fällen bestätigt werden, allerdings sind dies Sonderfälle, aus denen

keine Allgemeingültigkeit geschlossen werden kann. Für eine genauere Untersuchung, ob diese Veränderungen wirklich auf anthropogene Einflüsse zurückgehen, ist möglicherweise ein breitere Grundlage an Daten zur Beeinflussung der einzelnen Pegel hilfreich. So wurden durch die angewendeten Methoden teilweise Zeitreihen herausgefiltert, bei denen Auflandungen im Pegelbereich für eine scheinbare Erhöhung des Abflusses gesorgt haben oder es gab trotz der sorgfältigen Auswahl der Zeitreihen Pegelverschiebungen, die zu Beginn nicht erkennbar waren.

Über den Einfluss von Einleitungen durch Kläranlagen konnten keine Erkenntnisse gewonnen werden. Hierfür könnten an sich überlegen, ob man das Problem punktuell mit den einzelnen Kläranlagen angeht, oder ob es sinnvoll wäre, hier den Zufluss über ein Raster in Verbindung mit der Bevölkerungsdichte und der Landnutzung zu untersuchen. Auch eine Befragung der zuständigen Bewirtschafter der Talsperren könnte ein interessanter Punkt sein um großflächig Informationen zum Niedrigwassermanagement zu bekommen, denn diese nur schwer zugänglich. Abschließend kann man sagen, dass durchaus von einem anthropogenen Einfluss auf hydrologische Dürren ausgegangen werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestärken diese These, können allerdings auch diesen Einfluss nicht in Breite genau definieren.

7 Literaturverzeichnis

Bayerisches Landesamt für Umwelt. Niedrigwasser in Bayern: Grundlage, Veränderung und Auswirkungen. 2016.

B. S. Beyene, A. F. van Loon, H. A. J. van Lanen, and P. J. J. F. Torfs. Investigation of variable threshold level approaches for hydrological drought identification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(11):12765–12797, 2014.

Giuliano Di Baldassarre, Fabian Martinez, Zahra Kalantari, and Alberto Viglione. Drought and flood in the anthropocene: Feedback mechanisms in reservoir operation. *Earth System Dynamics*, 8(1):225–233, 2017.

A. K. Fleig, L. M. Tallaksen, H. Hisdal, and S. Demuth. A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(4):535–552, 2006.

IPCC. Klimaänderung 2014 – ipcc-synthesebericht. IPCC-Synthesebericht, 2014.

Zbigniew W. Kundzewicz and Alice J. Robson. Change detection in hydrological records—a review of the methodology / revue m´ethodologique de la d´etection de changements dans les chroniques hydrologiques. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1):7–19, 2004.

J. I. Lopez-Moreno, S. M. Vicente-Serrano, S. Begueria, J. M. Garcia-Ruiz, M. M. Portela, and A. B. Almeida. Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The lower river tagus, spain and portugal. *Water Resources Research*, 2009.

Zhenmei Ma, Shaozhong Kang, Lu Zhang, Ling Tong, and Xiaoling Su. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest china. *Journal of Hydrology*, 352(3-4):239–249, 2008.

Iman Mallakpour and Gabriele Villarini. A simulation study to examine the sensitivity of the pettitt test to detect abrupt changes in mean. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2):245–254, 2015.

Thomas B. McKee, Nolan J. Doesken, and John Kleist, editors. The relationship of drought frequency and duration to time scales, volume 22, 1993. American Meteorological Society Boston, MA.

A. K. Mishra, V. P. Singh, and V. R. Desai. Drought characterization: A probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(1):41–55, 2009.

Ashok K. Mishra and Vijay P. Singh. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2):202–216, 2010.

M“unchener Re. Naturkatastrophen 2012. analysen. bewertungen. positionen. TOPICS GEO, 302-07741, 2013.

A. N. Pettitt. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2):126, 1979.

Sally Rangecroft, Anne F. van Loon, H´ector Maureira, Koen Verbist, and David M. Hannah. Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region. *Earth System Dynamics Discussions*, pages 1–32, 2016.

Justin Sheffield, Eric F. Wood, and Michael L. Roderick. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424):435–438, 2012.

Shraddhanand Shukla and Andrew W. Wood. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2):1100, 2008.

Lena M. Tallaksen and Henny A. J. van Lanen. *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier, 2004. ISBN 0444517677. Anne F. van Loon. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4):359–392, 2015.

Anne F. van Loon, Tom Gleeson, Julian Clark, Albert I. J. M. van Dijk, Kerstin Stahl, Jamie Hannaford, Giuliano Di Baldassarre, Adriaan J. Teuling, Lena M. Tallaksen, Remko Uijlenhoet, David M. Hannah, Justin Sheffield, Mark Svoboda, Boud Verbeiren, Thorsten Wagener, Sally Rangecroft, Niko Wanders, and Henny A. J. van Lanen. Drought in the anthropocene. *Nature Geoscience*, 9(2):89–91, 2016.

Sergio M. Vicente-Serrano, Santiago Beguer´ia, and Juan I. L´opez-Moreno. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7):1696–1718, 2010.

Sergio M. Vicente-Serrano, Juan I. L´opez-Moreno, Santiago Beguer´ia, Jorge Lorenzo-Lacruz, Cesar Azorin-Molina, and Enrique Mor´an-Tejeda. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2):318–332, 2012.

Sergio M. Vicente-Serrano, Juan-I Lopez-Moreno, Santiago Beguer´ia, Jorge Lorenzo-Lacruz, Arturo Sanchez-Lorenzo, Jos´e M. Garc´ia-Ruiz, Cesar Azorin-Molina, Enrique Mor´an-Tejeda, Jes´us Revuelto, Ricardo Trigo, Fatima Coelho, and Francisco Espejo. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern europe. *Environmental Research Letters*, 9(4):044001, 2014.

N. Wanders and Y. Wada. Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. *Journal of Hydrology*, 526:208–220, 2015.

Donald A. Wilhite and Michael H. Glantz. Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3):111–120, 1985.

Emir Zelenhasi´c and Atila Salvai. A method of streamflow drought analysis. *Water Re-*

sources Research, 23(1):156–168, 1987.

Shurong Zhang and X. X. Lu. Hydrological responses to precipitation variation and diverse human activities in a mountainous tributary of the lower xijiang, china. CATENA, 77(2):130–142, 2009.

Anhang

A Verhalten SPI2 und SPI6 zu SSI

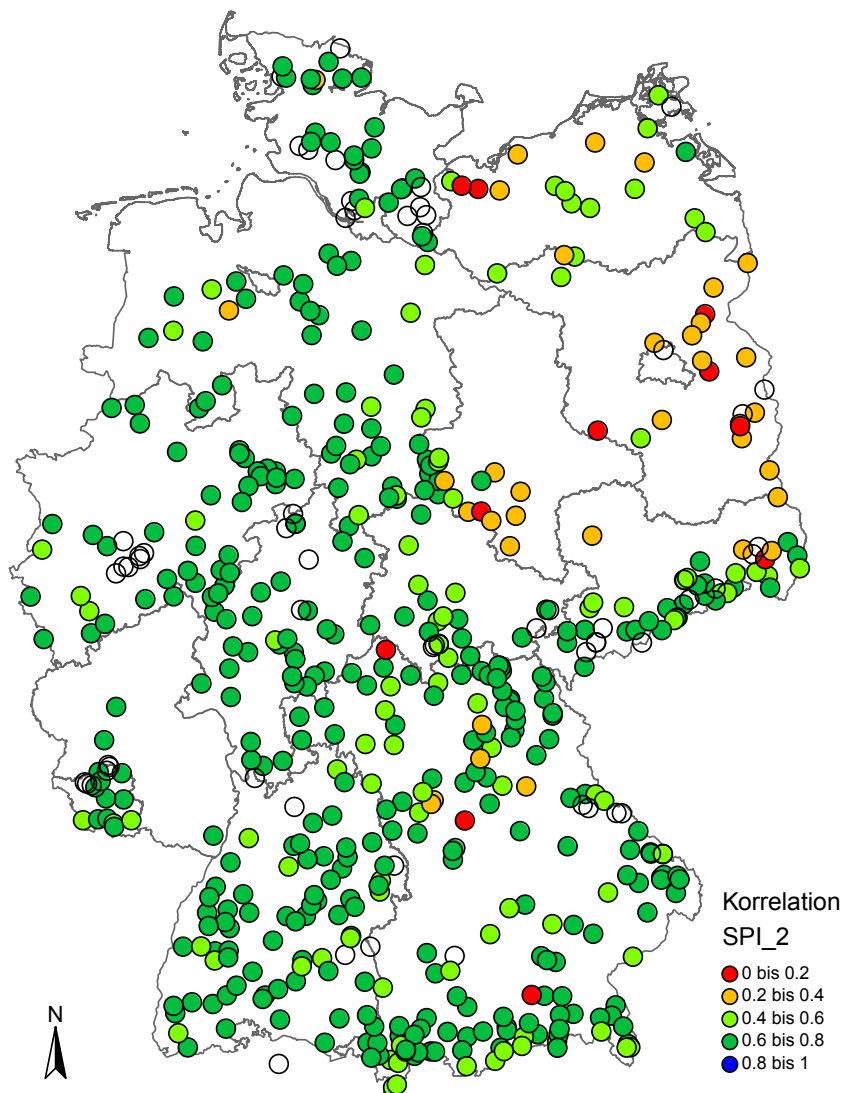


Abbildung 18 Korrelation des SPI.2 mit dem SSI.

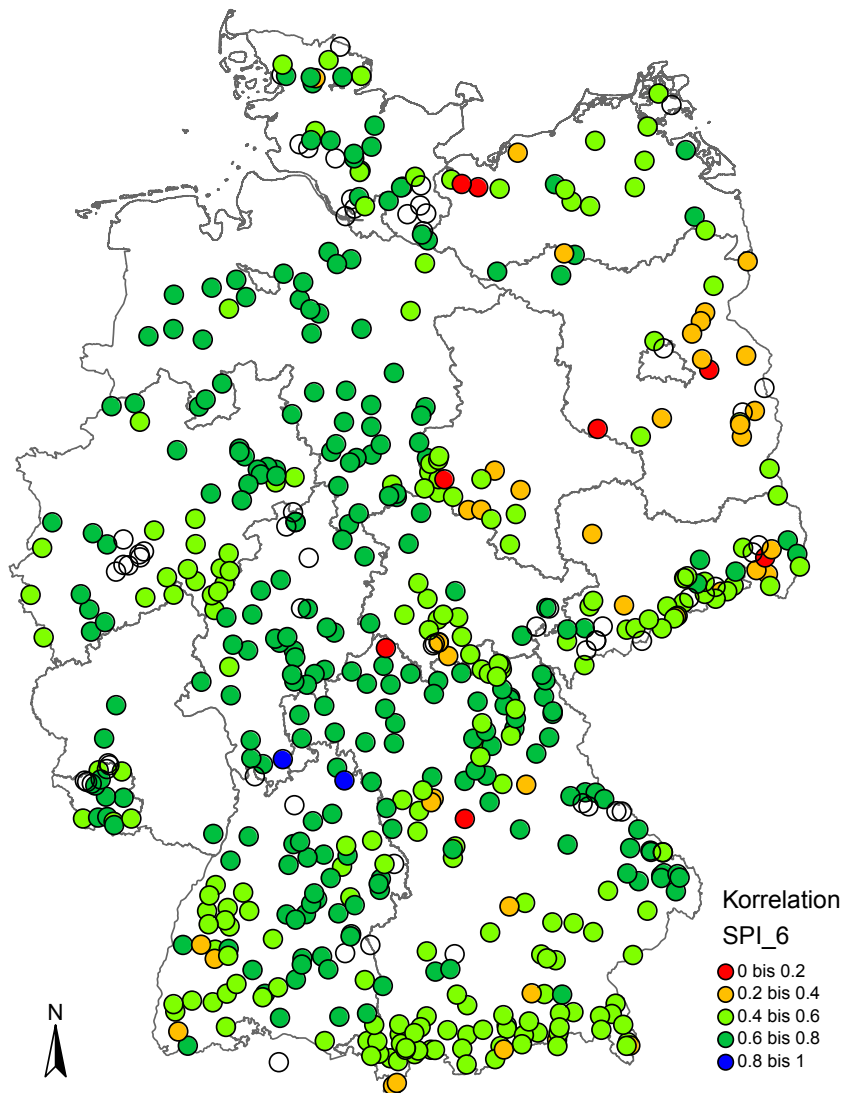


Abbildung 19 Korrelation des SPI_6 mit dem SSI.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich meine Abschlussarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Datum:

(Unterschrift)

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Umwelt. Niedrigwasser in bayern: Grundlage, veränderung und auswirkungen. 2016.
- B. S. Beyene, A. F. van Loon, H. A. J. van Lanen, and P. J. J. F. Torfs. Investigation of variable threshold level approaches for hydrological drought identification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(11):12765–12797, 2014. ISSN 1812-2116. doi: 10.5194/hessd-11-12765-2014.
- Giuliano Di Baldassarre, Fabian Martinez, Zahra Kalantari, and Alberto Viglione. Drought and flood in the anthropocene: Feedback mechanisms in reservoir operation. *Earth System Dynamics*, 8(1):225–233, 2017. ISSN 2190-4987. doi: 10.5194/esd-8-225-2017. URL <https://s3.amazonaws.com/crawl.prod.proquest.com/fpcache/7967d2e9d0b59f53fee8cb9b0cbdcc89.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJF7V7KNV2KKY2NUQ&Expires=1502876556&Signature=y4eXca9XET4gwc2f0K7BTOKivdE%3D#view=FitV>.
- A. K. Fleig, L. M. Tallaksen, H. Hisdal, and S. Demuth. A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(4):535–552, 2006. ISSN 1607-7938. doi: 10.5194/hess-10-535-2006.
- IPCC. Klimaänderung 2014 – ipcc-synthesebericht. *IPCC-Synthesebericht*, 2014. URL http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf.
- Zbigniew W. Kundzewicz and Alice J. Robson. Change detection in hydrological records— a review of the methodology / revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1):7–19, 2004. ISSN 0262-6667. doi: 10.1623/hysj.49.1.7.53993.
- J. I. López-Moreno, S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. M. García-Ruiz, M. M. Portela, and A. B. Almeida. Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The lower river tagus, spain and portugal. *Water Resources Research*, 45(2):n/a–n/a, 2009. ISSN 00431397. doi: 10.1029/2008WR007198.
- Zhenmei Ma, Shaozhong Kang, Lu Zhang, Ling Tong, and Xiaoling Su. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest china. *Journal of Hydrology*, 352(3-4):239–249, 2008. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.12.022.
- Iman Mallakpour and Gabriele Villarini. A simulation study to examine the sensitivity of the pettitt test to detect abrupt changes in mean. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2):245–254, 2015. ISSN 0262-6667. doi: 10.1080/02626667.2015.1008482.

- Thomas B. McKee, Nolan J. Doesken, and John Kleist, editors. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*, volume 22, 1993. American Meteorological Society Boston, MA.
- A. K. Mishra, V. P. Singh, and V. R. Desai. Drought characterization: A probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(1):41–55, 2009. ISSN 1436-3240. doi: 10.1007/s00477-007-0194-2. URL <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00477-007-0194-2.pdf>.
- Ashok K. Mishra and Vijay P. Singh. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2):202–216, 2010. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- Münchener Re. Naturkatastrophen 2012. analysen. bewertungen. positionen. *TOPICS GEO*, 302-07741, 2013.
- A. N. Pettitt. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2):126, 1979. ISSN 00359254. doi: 10.2307/2346729.
- Sally Rangecroft, Anne F. van Loon, Héctor Maureira, Koen Verbist, and David M. Hannah. Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region. *Earth System Dynamics Discussions*, pages 1–32, 2016. ISSN 2190-4995. doi: 10.5194/esd-2016-57.
- Justin Sheffield, Eric F. Wood, and Michael L. Roderick. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424):435–438, 2012. ISSN 1476-4687. doi: 10.1038/nature11575.
- Shraddhanand Shukla and Andrew W. Wood. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2):1100, 2008. ISSN 0094-8276. doi: 10.1029/2007GL032487.
- Lena M. Tallaksen and Henny A. J. van Lanen. *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier, 2004. ISBN 0444517677.
- Anne F. van Loon. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4):359–392, 2015. ISSN 20491948. doi: 10.1002/wat2.1085.
- Anne F. van Loon, Tom Gleeson, Julian Clark, Albert I. J. M. van Dijk, Kerstin Stahl, Jamie Hannaford, Giuliano Di Baldassarre, Adriaan J. Teuling, Lena M. Tallaksen, Remko Uijlenhoet, David M. Hannah, Justin Sheffield, Mark Svoboda, Boud Verbeiren, Thorsten Wagener, Sally Rangecroft, Niko Wanders, and Henny A. J. van Lanen. Drought in the anthropocene. *Nature Geoscience*, 9(2):89–91, 2016. ISSN 1752-0894. doi: 10.1038/ngeo2646.

- Sergio M. Vicente-Serrano, Santiago Beguería, and Juan I. López-Moreno. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7):1696–1718, 2010. ISSN 0894-8755. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- Sergio M. Vicente-Serrano, Juan I. López-Moreno, Santiago Beguería, Jorge Lorenzo-Lacruz, Cesar Azorin-Molina, and Enrique Morán-Tejeda. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2):318–332, 2012. ISSN 1084-0699. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433.
- Sergio M. Vicente-Serrano, Juan-I Lopez-Moreno, Santiago Beguería, Jorge Lorenzo-Lacruz, Arturo Sanchez-Lorenzo, José M. García-Ruiz, Cesar Azorin-Molina, Enrique Morán-Tejeda, Jesús Revuelto, Ricardo Trigo, Fatima Coelho, and Francisco Espejo. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern europe. *Environmental Research Letters*, 9(4):044001, 2014. ISSN 1748-9326. doi: 10.1088/1748-9326/9/4/044001.
- N. Wanders and Y. Wada. Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. *Journal of Hydrology*, 526:208–220, 2015. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.047.
- Donald A. Wilhite and Michael H. Glantz. Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3):111–120, 1985. ISSN 0250-8060. doi: 10.1080/02508068508686328.
- Emir Zelenhasić and Atila Salvai. A method of streamflow drought analysis. *Water Resources Research*, 23(1):156–168, 1987. ISSN 00431397. doi: 10.1029/WR023i001p00156.
- Shurong Zhang and X. X. Lu. Hydrological responses to precipitation variation and diverse human activities in a mountainous tributary of the lower xijiang, china. *CATENA*, 77(2):130–142, 2009. ISSN 03418162. doi: 10.1016/j.catena.2008.09.001.