

Mai-Britt Berghöfer, Erwin Rottler & Axel Bronstert

Statistische Untersuchung der Niedrigwasserentwicklung bis 2100 für die drei größten Nebenflüsse des Rheins: Main, Mosel und Neckar

Statistical analysis of low flow dynamics until 2100 for the three largest tributaries of the Rhine: Main, Moselle and Neckar

Hydrologische Dürreperioden, die mit niedrigen Pegelständen an Flüssen einhergehen, stehen häufig im Zusammenhang mit erheblichen ökologischen und wirtschaftlichen Beeinträchtigungen. Um die Häufigkeit und Intensität hydrologischer Dürren zu untersuchen, analysiert diese Arbeit zunächst gemessene und anschließend für die Zukunft modellierte Abflüsse anhand von charakteristischen Niedrigwasserkennwerten. Besonderen Anlass für diese Analyse boten die hydrologischen Extremjahre 2018 und 2019 am Rhein. Es stellt sich die Frage, ob infolge des geänderten Klimas, insbesondere der gestiegenen Durchschnittstemperaturen, bereits Veränderungen in der Niedrigwasserdynamik erkennbar sind und wie sich diese künftig entwickeln könnten.

Um diese Fragestellung beantworten zu können, verwendet diese Arbeit eine interaktive Analyseumgebung für eine deutschlandweite Niedrigwasseranalyse in täglicher Auflösung, die aus einem R-Paket und einer Webanwendung besteht. Die dafür entwickelten Funktionen und die Ergebnisse der Analyse werden hier am Beispiel des Mains, der Mosel und des Neckars vorgestellt.

Um zukünftige Niedrigwasserentwicklungen zu beurteilen, wurden die Kennwerte auch für die modellierten Abflusswerte der drei Flüsse bis zum Jahr 2100 bestimmt. Dazu diente ein Vergleich dreier repräsentativer Emissionsszenarien: RCP2.6, RCP6.0 und RCP8.5. Niedrigwasserereignisse und -perioden werden in dieser Analyse durch den gewässerspezifischen Q_{90} -Schwellenwert charakterisiert. Die hier verwendeten, nicht-schwellenwertbasierten Kennwerte beschreiben minimale Abflüsse in verschiedener zeitlicher Auflösung und das 7-Tage-Minimum (NM_7Q).

Die Ergebnisse zeigen, dass in den untersuchten Einzugsgebieten die Anzahl der Niedrigwassertage bereits gestiegen ist und in naher Zukunft (2040 bis 2069) weiter ansteigen wird. Die Niedrigwasserentwicklung bis zum Ende des Jahrhunderts (2070 bis 2099) ist hingegen stark abhängig von der zukünftigen Emissionsentwicklung. Für das Emissionsszenario RCP2.6 ist eine Entspannung der Niedrigwassersituation bis zum Ende des Jahrhunderts zu erwarten. Im Gegensatz dazu wird unter den Annahmen RCP6.0 und RCP8.5 eine weitere Verschärfung der Niedrigwassersituation prognostiziert, die sich in einer Verlängerung der Niedrigwassersaison sowie in häufigeren und/oder längeren Niedrigwasserperioden äußert.

Schlagwörter: Niedrigwasser, regionale Klimaänderung, Rhein, Mosel, Main, Neckar, Emissionsszenarien, hydrologische Modellierung, Abflusstrends

Hydrological droughts, which are accompanied by low flow levels of rivers, are often associated with considerable ecological and economical damage. In order to investigate the frequency and intensity of hydrological droughts, this study first analyzed discharge measurements and then modeled discharge values for the future using characteristic low flow indices. The extreme hydrological years 2018 and 2019 at the Rhine provided a particular occasion for this analysis. The question arises whether changes in low flow dynamics are already observable as a result of rising temperatures and how these may develop in the future.

To answer this question, this study developed an interactive analysis environment for a Germany-wide low flow analysis in daily resolution, which consists of an R package and a web application. The developed functions are presented here by example of the Moselle, Neckar, and Main rivers.

Furthermore, to assess future low flow developments, the characteristic values were also determined for the modelled discharge values of the three rivers up to the year 2100. For this purpose, the simulated discharge dynamics, driven by three representative emission scenarios (RCP2.6, RCP6.0, RCP8.5), were compared with each other.

For statistical analysis, low flow events and periods were characterized by the river-specific Q_{90} -threshold value. The implemented non-threshold-based parameters characterize minimum discharges at different temporal resolutions and for the 7-day minimum (NM_7Q).

The results show that the number of days with low flow conditions has already increased in the analyzed catchment areas and will continue to rise in the near future (2040 to 2069). In contrast, the development of low flow until the end of the century (2070 to 2099) is strongly dependent on the future development of emissions. For the RCP2.6 emissions scenario, the low flow situation is expected to improve by the end of the century. In contrast, under the assumptions RCP6.0 and RCP8.5, a further worsening of the low flow situation is predicted, which is reflected in an extension of the low flow season and more frequent and/or longer low flow periods.

Keywords: Low flow, regional climate change, Rhine, Moselle, Main, Neckar, emission scenarios, hydrological modelling, discharge trends

1 Einleitung

Im 21. Jahrhundert liegen 16 der 17 wärmsten Jahre, die seit dem Beginn der flächendeckenden Messungen im Jahr 1881 für Deutschland aufgezeichnet wurden (DWD 2020, EBNER VON ESCHENBACH et al., 2022). Die Jahresdurchschnittstemperatur in Deutschland ist zwischen 1951 und 2015 in jeder Dekade um 0,25 °C gestiegen und lag bereits 2021 1,6 °C über dem vorindustriellen Wert (KAHLENBORN et al., 2021). Gemäß Klimaprojektionen wird die Mitteltemperatur Deutschlands zunächst unabhängig von dem betrachteten Emissionsszenario weiter steigen. Diese Klimaänderung erhöht die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Intensität klimatischer Extremereignisse (BÜRGER et al., 2021; KAHLENBORN et al., 2021).

Die übliche Niederschlagsmenge im April war in den Jahren zwischen 2007 und 2020 im Großteil Mitteleuropas durchschnittlich um 50 % geringer, während die Temperaturen untypisch hoch waren (IONITA et al., 2020). Da Niedrigwassersituationen oftmals eine Folge von langanhaltenden, stabilen Hochdruckwetterlagen sind, treten sie oft großflächig auf (UBA 2019). GÜNTNER et al. (2023) analysieren die Veränderungen des gesamten Wasserspeichers (total water storage, TWS) in Deutschland über die letzten 20 Jahre. Diese wirken sich aufgrund der Wechselwirkung zwischen Grund- und Oberflächenwasser auch auf die Durchflussraten der Flüsse aus, insbesondere bei Niedrigwasser. Die Studie basiert auf Daten zur Veränderung des Erdschwerefeldes aus der Satellitenmission „Gravity Recovery and Climate Experiment“ (GRACE/GRACE-FO). Nach dieser Analyse entspricht der langfristige durchschnittliche Rückgang der Grundwassermenge -2,1 mm Wasseräquivalent pro Jahr. Der Verlust des gesamten in Deutschland gespeicherten Wassers in den letzten 20 Jahren beträgt demnach 42 mm, was 15,2 km³ entspricht. Dieser Wert ist etwa ein Drittel der durchschnittlichen jährlichen bzw. saisonalen Amplitude des in Aquiferen und der ungesättigten Zone gespeicherten Wassers in Deutschland.

In der vom Umweltbundesamt veröffentlichten Bestandsaufnahme zur aktuellen Situation in Deutschland hinsichtlich Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung wird deutlich, dass seit 1950 keine deutliche Veränderung der Gesamtniederschläge, jedoch eine Verschiebung jahreszeitlicher Muster zu beobachten ist. Demnach nehmen im Sommer die Trockentage immer weiter zu, während die Niederschlagsmenge im Winter, insbesondere in Westdeutschland, weiter zunimmt (BRASSEUR et al., 2017; BRIENEN et al., 2013; RIEDEL et al., 2021). Besonderen Anlass für die Analyse der Abflusstrends boten die hydrologischen Extremjahre 2018 und 2019. Als Folge eines Niederschlagsdefizites zwischen Februar und November 2018 führten ungewöhnlich niedrige Pegelstände am Rhein zu ökologischen und wirtschaftlichen Beeinträchtigungen (ADEMMER et al., 2019; IKSR, 2020).

TRAUTH & HAUPT (2022) erarbeiteten als Reaktion auf das Extremjahr 2018 eine statistische Niedrigwasseranalyse für Thüringen. Dabei stellte sich heraus, dass die Niedrigwassersituation im Jahr 2018 vergleichsweise lang, gleichmäßig und ausgedehnt über das gesamte Entwicklungsgebiet anhielt. Es zeigte sich jedoch, dass vergleichbar extreme Niedrigwasserereignisse in jedem Jahrzehnt auftraten (TRAUTH & HAUPT, 2022). Auch OESTERMANN & MUDERSBACH (2021) gingen der Frage nach, ob die zuletzt häufiger beobachteten Niedrigwasserereignisse bereits in langfristigen Niedrigwassertrends erkennbar sind und

ob manche Regionen in Deutschland stärker von Niedrigwasser betroffen sind als andere. Diese großflächige Analyse zeigte, dass bisher kaum statistisch signifikante Niedrigwassertrends erkennbar sind (OESTERMANN & MUDERSBACH, 2021). In einer weiteren Studie untersuchten KREYE et al. (2017) die Niedrigwassersituation bis 2100 im Aller-Leine-Oker Einzugsgebiet. Dabei bestimmten sie für die mittlere bis ferne Zukunft, ab den 2030er Jahren, eine starke Verringerung des NM:Q-Niedrigwasserabflusses, des niedrigsten arithmetischen Mittels des Abflusses von 7 aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts. Die von HUANG et al. (2015) ausgewerteten Prognosen des ökohydrologischen Modells SWIM zeigen, dass extreme Dürreereignisse im Rheineinzugsgebiet zwischen 2061 und 2100 mit hoher Wahrscheinlichkeit häufiger auftreten werden (HUANG et al., 2015).

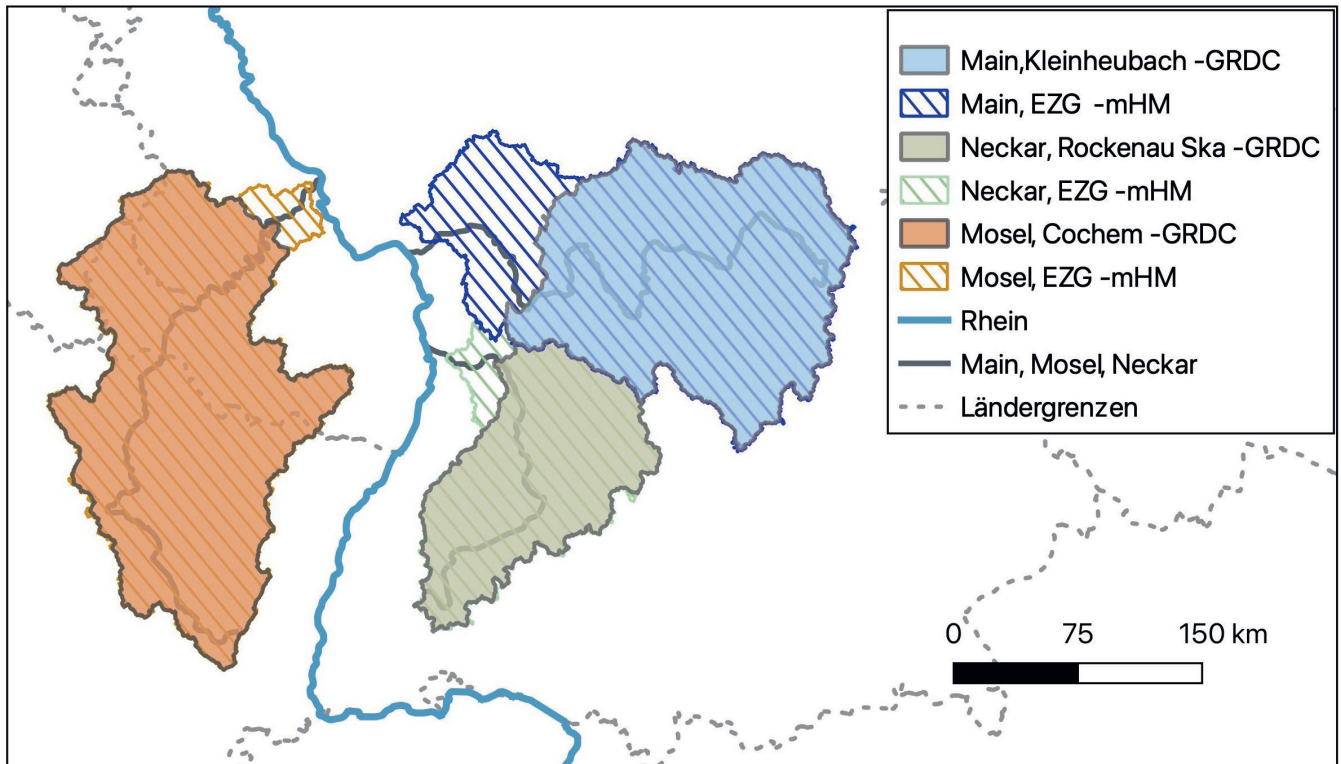
Diese Studie analysiert die Abflüsse der drei größten Nebenflüsse des Rheins – Mosel, Neckar und Main. Der Rhein ist Europas meistbefahrene Binnenwasserstraße. Neben seiner ökonomischen Bedeutung ist das 185.000 km² große Einzugsgebiet auch ökologisch von höchster Bedeutung und außerdem der Lebensraum von 60 Millionen Menschen (BELZ et al. 2007). Sein Abfluss ist sowohl pluvial als auch nival geprägt. Die hier betrachteten Nebenflüsse weisen vorrangig pluviale Abflussregime auf und überlagern den nivalen Einfluss des Rheins flussabwärts, weswegen die Niedrigwasser flussabwärts meist spätsommerlich auftreten.

Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, ob an den drei größten Nebenflüssen des Rheins die Intensität und die Häufigkeit von Niedrigwassersituationen als Folge von steigenden Mittel- und Maximaltemperaturen bereits zugenommen haben oder bis zum Ende des Jahrhunderts zunehmen werden. Die dafür verwendeten Methoden wurden in einer interaktiven Analysenumgebung gebündelt und sind quelloffen verfügbar.

2 Datengrundlage

Die gemessenen Abflussdaten stellt das Global Runoff Data Centre (GRDC) zur Verfügung (GRDC, 2020). Zum Zeitpunkt der Analyse (2023) umfasste der GRDC Datensatz Zeitreihen mit täglicher Auflösung für 330 Messstationen an 204 Flüssen deutschlandweit, die in die interaktive Analyseumgebung integriert wurden. Der Fokus der hier vorgestellten Niedrigwasseranalyse sind die drei größten Nebenflüsse des Rheins: der Main, die Mosel und der Neckar. Die Zeitreihe für Kleinheubach am Main umfasst 62 Jahre, für Cochem an der Mosel 120 Jahre und für Rockenau Ska am Neckar 70 Jahre bis 2019 (Abb. 1).

Die modellierten Daten basieren auf der Modellierung von RÖTTLER et al. (2021). In derselben Studie findet sich auch eine detaillierte Beschreibung der hydrologischen Simulationen und der angewendeten Kalibrierungsmethoden. Dabei wurde die Version v.5.10 des gitterbasierten, mesoskaligen hydrologischen Modells (mHM) (SAMANIEGO et al., 2019) verwendet. In den modellierten Daten sind keine anthropogenen Eingriffe wie bauliche Veränderungen oder Konzepte der künstlichen Niedrigwasseraufhöhung enthalten. Die meteorologischen Antriebsdaten des mHM bestehen aus Durchschnitts-, Höchst- und Minimaltemperaturen sowie Niederschlagsdaten in täglicher Auflösung (HAYLOCK, et al. 2008, HEMPEL, et al. 2013). Die Klimamodell-daten sind ein Ergebnis des Inter-Sectoral Impact Model Inter-

**Abbildung 1**

Lage der betrachteten Einzugsgebiete der GRDC-Daten und der simulierten Abflussreihen (mHM) des Mains, der Mosel und des Neckars.
 Location of the catchment areas of the GRDC-data and the simulated discharge series (mHM) of the Main, Moselle, and Neckar rivers.

comparison Project (ISI-MIP) (HEMPEL et al., 2013). Im Rahmen von ISI-MIP wurden täglich aufgelöste Zeitreihen von fünf globalen Klimamodellen (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSLCMSA-LR, MIROC-ESM-CHEM und NorESM1-M) bilinear auf ein Gitter interpoliert und Bias-korrigiert (ROTTLER et al., 2021).

Die Simulationen umfassen für jedes der betrachteten Einzugsgebiete modellierte Abflusszeitreihen sowohl für historische Zeiträume als auch für zukünftige Klimabedingungen, die auf drei repräsentativen Konzentrationspfaden (representative concentration pathways, RCPs) basieren: RCP2.6, RCP6.0 und RCP8.5. Der abgedeckte Zeitraum reicht von 1950 bis 2099.

Die für den 5. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), entwickelten RCP-Szenarien beschreiben den Effekt der klimarelevanten Treibhausgase in CO_2 -Äquivalenten auf den Strahlungsantrieb der Erde in Watt pro Quadratmeter [W/m^2] bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Das Szenario RCP2.6 entspricht den in Paris vereinbarten Zielen von 2015 (COP21, 2015) und beschreibt einen konstanten Rückgang der Emissionen nach 2020, sodass eine globale Erwärmung um 2°C bis 2100 nicht überschritten wird. Das RCP6.0-Szenario beinhaltet eine Stabilisierung des Strahlungsantriebs um 2100 nach einem Anstieg auf ca. 850 ppm CO_2 -Äquivalente, gefolgt von einem abnehmenden Strahlungsantrieb bis 2300. Das RCP8.5 Szenario stellt hohe Emissionen dar und wird in dieser Arbeit als worst-case-Szenario betrachtet, da die zwischen den Jahren 2000 und 2100 für das RCP8.5 angenommenen CO_2 -Äquivalente zwischen dem 90. und 98. Perzentil aller veröffentlichten Szenarien liegen (VAN VUUREN et al., 2011).

Gemäß des sechsten Sachstandsberichts des IPCC (LEE et al., 2021), wird sich die mittlere globale Oberflächentemperatur in dem Zeitraum zwischen 2021 und 2040 kurzfristig unabhängig von dem betrachteten Szenario wahrscheinlich auf $1,5^\circ\text{C}$ gegenüber dem Referenzzeitraum von 1850 bis 1900 erhöhen. Während schon in dem Zeitraum zwischen 2041 und 2060 Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien erkennbar sind, nehmen die Differenzen zum Ende des Jahrhunderts, 2081 bis 2100, deutlich zu.

3 Die statistische Niedrigwasseranalyse

3.1 Das R-Paket und die Webanwendung

Die vorgestellte Niedrigwasseranalyse wurde in der statistischen Softwareumgebung (R CORE TEAM, 2023) durchgeführt. Die entwickelten Funktionen sind in dem R-Paket „lfanalyse“ gebündelt auf GitHub (BERGHÖFER et al., 2022a) abrufbar. Das Paket verfügt neben den Funktionen zum Einlesen und Strukturieren der Daten auch über Funktionen für die Zeitreihen- und Niedrigwasseranalyse und ermöglicht so einen einfachen Zugang zu den hier verwendeten Methoden der statistischen Auswertung in R (Abb. 2). Basierend auf diesem R-Paket wurde die interaktive Analyseumgebung (BERGHÖFER et al., 2023) „Low Flow Analysis“ mit Hilfe des R-Paketes „Shiny“ (CHANG et al., 2021) entwickelt (Abb. 2, Abb. 3) um eine erste, deutschlandweite Niedrigwasseranalyse auch ohne R-Vorkenntnisse zu ermöglichen. Diese frei zugängliche Anwendung, die auf dem GRDC-Datensatz (GRDC, 2020) basiert, lässt sich jederzeit nutzen, erweitern und modifizieren.

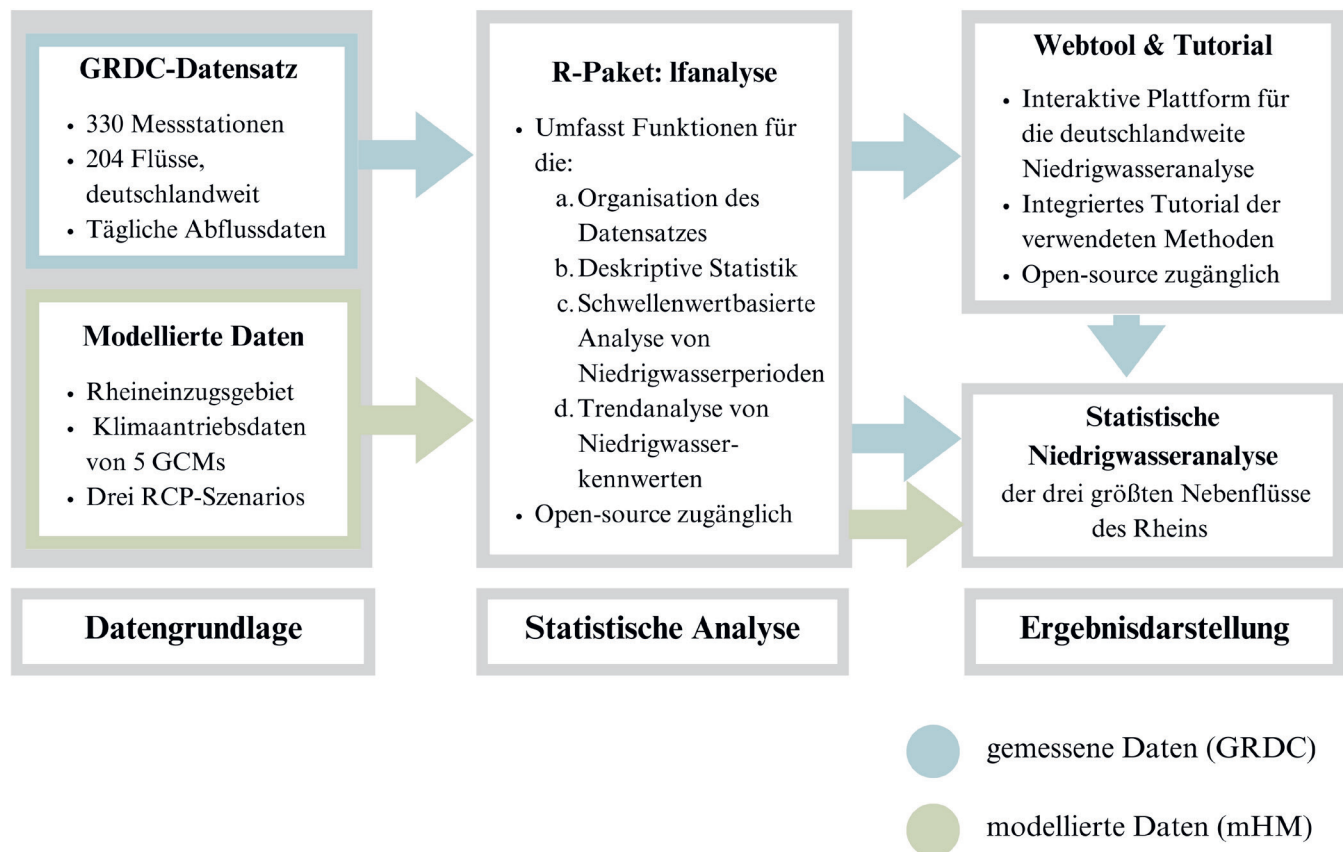


Abbildung 2

Schematische Abbildung der Analyseumgebung.
Schematic illustration of the analysis environment.

Dabei ist es wichtig, die Ergebnisse der Anwendung im Kontext der Eingriffe in das hydrologische Regime des betrachteten Gewässers, wie beispielsweise Staudämme oder Einleitungen, kritisch zu bewerten. Da Pegel mit anthropogenen Beeinflussungen analysiert werden, ist eine direkte Verknüpfung der Ergebnisse mit dem Klimawandel nicht uneingeschränkt möglich. Die der Analyse zu Grunde liegenden Konzepte und Funktionen wurden darüber hinaus in einem Tutorial (BERGHÖFER et al., 2022b) zusammengefasst, dass den Einstieg in die Niedrigwasseranalyse erleichtern soll.

3.2 Gewählte Niedrigwasserkennwerte

Alle Analysen in dieser Auswertung beziehen sich auf das hydrologische Jahr gemäß der DIN 4049-1. Es beginnt am 1. November und endet am 31. Oktober des Folgejahres, um auch Niederschläge zu erfassen, die im Herbst des Vorjahres gefallen sind. Diese sind unter anderem als Grundwasser oder Schnee im Einzugsgebiet gespeichert und werden erst im Folgejahr abflusswirksam (DIN, 1992). Ein Problem bei der Auswahl dieses Zeitabschnittes ist, dass Niedrigwasserperioden über den Jahreswechsel des hier definierten Abflussjahres hinausreichen können. Eine Alternative, um dieses Problem zu umgehen, ist die Wahl des Wasserhaushaltsjahres (1. April bis 31. März) (EBNER VON ESCHENBACH et al. 2022). Um zu untersuchen, ob sich extreme Niedrigwasserperioden über den Jahreswechsel des hydrologischen Jahres erstrecken, und um zu prüfen, ob die Wahl des hier verwendeten Abflussjahres gerechtfertigt ist, wird die Analyse in dieser Arbeit nicht nur für den Zeitabschnitt eines Jahres, son-

dern auch in monatlicher Auflösung berechnet. Dafür fanden sowohl schwellenwertbasierte als auch nicht schwellenwertbasierte Kennwerte in dieser Arbeit Verwendung (Tab. 1, Abb. 4).

Für schwellenwertbasierte Niedrigwasserkennwerte bietet es sich an, den Schwellenwert quantilbasiert festzulegen, um eine Vergleichbarkeit zwischen Flüssen verschiedener Größe zu garantieren. Der Schwellenwert Q_x in Kubikmetern pro Sekunde bezeichnet den Abfluss, der an X % der Tage innerhalb des Bezugszeitraumes entweder erreicht oder überschritten wurde (LAAHA & BÖSCHL, 2006). Das Quantil Q_x wird auf der Grundlage des gesamten historischen Datensatzes einer Station berechnet. Üblicherweise liegt der Schwellenwert Q_5 für Niedrigwasser in dem Bereich zwischen dem 70%- und dem 95%-Quantil, Q_{70} bzw. Q_{95} (OESTERMANN & MUDERSBACH, 2021). Gemäß dem deutschen Dürremonitor kennzeichnen die Werte Q_{70} bis Q_{80} eine „ungewöhnliche Trockenheit“, während bei niedrigeren Werten von einer Dürre auszugehen ist (HÜLSMANN et al., 2021).

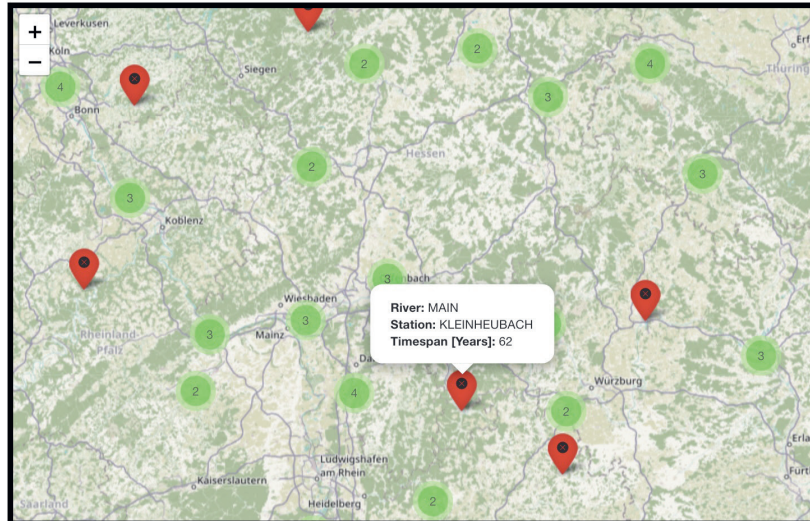
In dieser Auswertung wurde der Q_{90} -Schwellenwert gewählt, um Niedrigwasser zu definieren. Dieser niedrige Schwellenwert spiegelt Episoden mit extremeren Bedingungen wider, konkret also starke Niedrigwasserbedingungen (HÜLSMANN et al., 2021). Dadurch passt er zum Fokus dieser Arbeit, der Analyse der Zunahme von Häufigkeit und Intensität hydrologischer Dürren. Die Ergebnisse mit dem niedrig gewählten Schwellenwert lassen sich von „ungewöhnlicher Trockenheit“ abgrenzen, sodass lediglich „Dürren“ in die Auswertung einfließen.

Low Flow Analysis

Analysis

Map Table

2. Auswahl der Station



1. Auswahl des Analysewerkzeugs

Analysing tool
Time series Analysis

Output Options:
Discharge Hydrograph

3. Ergebnisplot

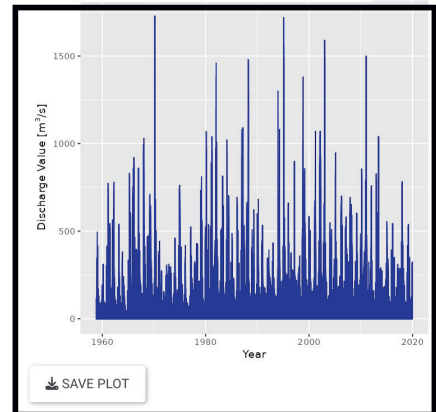


Abbildung 3

Vorstellung der interaktiven Analyseumgebung. Die Umgebung bietet neben den in dieser Analyse betrachteten Einzugsgebieten die Möglichkeit einer deutschlandweiten Niedrigwasseranalyse und ist ohne Vorkenntnisse in R nutzbar. Die Website greift für die Analyse auf das R-Paket Ifanalyse zurück. Der verknüpfte Datensatz ist der GRDC-Datensatz für Deutschland.

Overview of the interactive analysis environment. In addition to the catchment areas considered in this analysis, the environment offers the opportunity of a Germany-wide low flow analysis and can be used without prior knowledge of R. The website uses the R package Ifanalyse for the analysis. The linked data set is the GRDC data set for Germany.

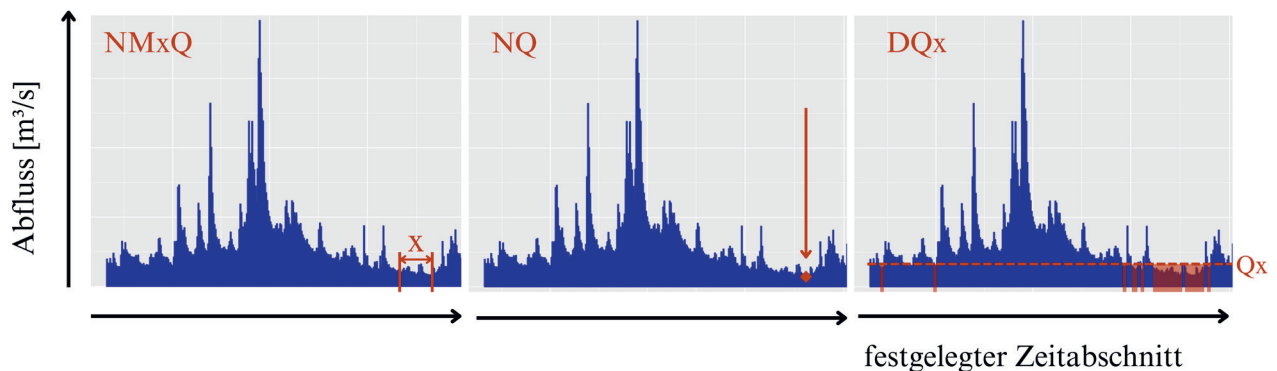


Abbildung 4

Schematische Abbildung der in dieser Analyse verwendeten Niedrigwasserkennwerte (abgewandelt von EBNER VON ESCHENBACH et al., 2022). Schematic illustration of the low flow parameters used in this analysis (modified from EBNER VON ESCHENBACH et al., 2022).

Tabelle 1

Übersichtstabelle der verwendeten Niedrigwasserkennwerte (LAAHA & BÖSCHL, 2006; MANIAK, 2016; EBNER VON ESCHENBACH et al., 2022). The low flow parameters applied (LAAHA & BÖSCHL, 2006; MANIAK, 2016; EBNER VON ESCHENBACH et al., 2022).

Kennwert	Einheit	Kategorie	Definition
DQ ₉₀	Tage	schwellenwertbasiert und quantilbasiert	Summe der Tage, an denen der Schwellenwert in bestimmtem Zeitabschnitt unterschritten wird.
NM ₇ Q	m³/s	nicht schwellenwertbasiert	Niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses von 7 aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts.
NQ	m³/s	nicht schwellenwertbasiert	Niedrigster Abflusswert innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts.

Der Niedrigwasserkennwert ergibt sich in dieser Arbeit aus der Summe der Tage eines bestimmten Zeitabschnitts, an denen der Q_{90} -Schwellenwert unterschritten wird. Im Folgenden wird dieser Kennwert als DQ_{90} bezeichnet und in Tagen angegeben. Außerdem wurde der niedrigste Durchfluss in einer Zeitspanne (NQ) nach DIN 4049-3 berechnet.

Der Niedrigwasserabflusswert $NM \times Q$ in Kubikmetern pro Sekunde beschreibt das niedrigste arithmetische Mittel von x aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines festgelegten Zeitabschnitts. In dieser Arbeit wurde $x = 7$ Tage gewählt. Bei der Auswahl größerer Werte, z. B. $x > 30$, könnten unter Umständen auch Niedrigwasserperioden erfasst werden, die in der Größenordnung des Mittelwasserbereichs liegen. Im Gegensatz dazu ist bei kleineren x -Werten (insbesondere $x = 1$) der Einfluss von kurzfristigen Störungen wie Entnahmen, Eisstau oder Schwellbetrieb auf das Ergebnis sehr hoch (EBNER VON ESCHENBACH et al., 2022). In der Webanwendung ist x frei wählbar.

Die hier vorgestellten Niedrigwasserkennwerte (Tab. 1, Abb. 4) sind lediglich eine kleine Auswahl der umfangreichen Sammlung von Kenngrößen, die das DWA Merkblatt 541 (EBNER VON ESCHENBACH et al., 2022) vorstellt.

3.3 Zeitabschnitte der Analyse

Um die Häufigkeit und Intensität der zuletzt beobachteten Niedrigwasserereignisse in den Kontext der langjährigen GRDC-Messreihen zu setzen, wurden die Kennwerte für festgelegte, gleich lange Zeiträume, hier als Zeitscheiben (T1 und T2) bezeichnet, gemittelt und miteinander verglichen. T1 umfasst die Jahre 1960 bis 1989 und T2 1990 bis 2019 (Tab. 2).

Für die Analyse der modellierten Daten hingegen kamen andere Zeitscheiben zur Anwendung (Tab. 2), was mit den bis 2100 zunehmenden Differenzen zwischen den unterschiedlichen CO_2 -Konzentrationspfaden und damit voneinander abweichenden Annahmen für die Entwicklung des Strahlungsantriebs der Erde für die unterschiedlichen RCP-Szenarien begründet ist.

Da die mittlere globale Oberflächentemperatur (PÖRTNER et al., 2022; LEE et al., 2021) sowie die mittlere Oberflächentemperatur Deutschlands (KAHLENBORN et al., 2021; KULKARNI & STORCH, 1995) zunächst unabhängig vom Szenario weiter steigen werden, sind die Unterschiede zwischen den Szenarien in der „nahen Zukunft“ voraussichtlich gering. Im Gegensatz dazu ist zu erwarten, dass die Differenzen zwischen den Szenarien zum Ende des Jahrhunderts deutlich zunehmen (LEE et al., 2021), weswegen auch in den Analyseergebnissen für die „ferne Zukunft“ größere Unterschiede zwischen den Szenarien auftreten.

Um diesen Unterschied zwischen den gewählten Zeitscheiben darzustellen, wurden in Abbildung 5 die Mittelwerte der Temperatur-Simulationsergebnisse des ISI-MIP-Projekts für die „nahe“ und „ferne Zukunft“ abgebildet. In der „nahen Zukunft“ ist die modellierte Temperaturänderung gegenüber dem Referenzzeitraum (1970 bis 1999) für das RCP6.0-Szenario auf einem vergleichbaren Niveau wie für das RCP2.6-Szenario. Größer dahingegen ist die Differenz zum RCP8.5. In der „fernen Zukunft“ treten die Unterschiede zwischen den betrachteten RCP-Szenarien deutlich hervor (Abb. 5). Für die Analyse der modellierten Daten wurden daher die folgenden drei Zeitscheiben gegenübergestellt: der Referenzzeitraum historisch (Hist) von 1970 bis 1999, die „nahe Zukunft“ von 2040 bis 2069 und die „ferne Zukunft“ von 2070 bis 2099 (Tab. 2).

Diese Unterteilung dient dazu, den Einfluss der verschiedenen Temperaturänderungen – und damit der zu erwartenden höheren Verdunstungsraten in den Flusseinzugsgebieten – in Abhängigkeit des RCP-Szenarios auf das Niedrigwasser- und Abflussgeschehen darzustellen.

3.4 Trendberechnung

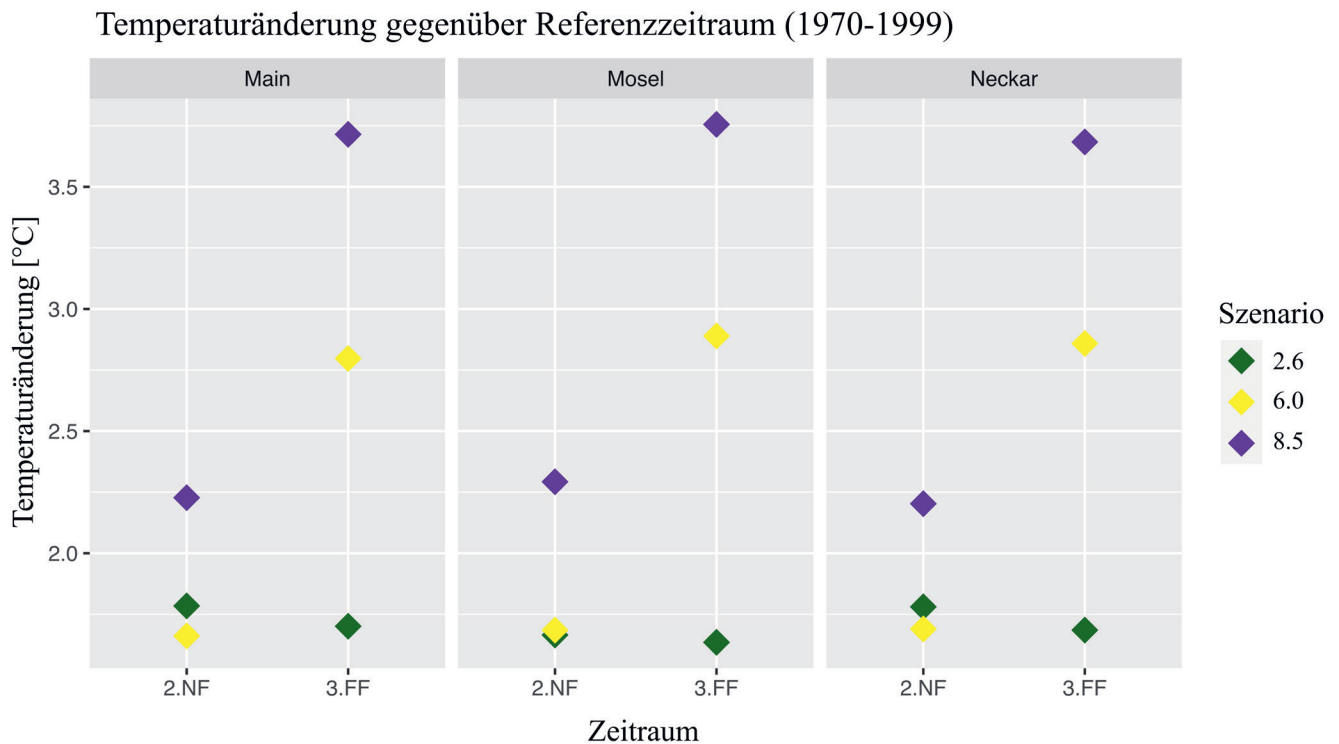
Die Ermittlung eines Trends erfolgt in dieser Arbeit grundsätzlich nach zwei Ansätzen, der linearen Regression und der Trendermittlung mit dem „Sen's Slope Estimator“ (BRONAUGH et al., 2023). Ziel der Trendanalyse ist es zu prüfen, ob das Eintreten der Zielvariable y durch die Einflussvariable x in einem linearen Modell erklärt werden kann (FROST, 2018). In dieser Arbeit ist die abhängige Variable y der $NM \times Q$ -Kennwert in Kubikmetern pro Sekunde und die unabhängige Variable x ist die Zeit in Tagen.

Für die Gültigkeit des linearen Modells sind einige Grundannahmen zu treffen. Demnach muss die Varianz konstant sein, also darf kein Muster in den Residuen vorliegen. Zudem ist es erforderlich, dass die Residuen normalverteilt und unabhängig sind. Ein wesentliches Problem der Analyse von hydrologischen oder klimatischen Zeitreihen besteht darin, dass die Residuen nicht unabhängig, sondern durch eine Autokorrelation geprägt sind; diese gibt an, wie stark die Werte zeitlich voneinander abhängen (HUXOL et al., 2007).

Wenn der sichtbare Trend der vorliegenden Zeitreihe die Summe aus einem vorherrschenden Trend und einem durch Autokorrelation erzeugten Rauschen ist (ZHANG & ZWIERS, 2004), eignet sich der Ansatz des „prewhitening“, um die Autokorrelation zu korrigieren (KULKARNI & STORCH, 1995; LAAHA & BÖSCHL, 2006; LEE et al., 2021; MANIAK, 2016; OESTERMANN & MUDERSBACH, 2021).

Tabelle 2
Darstellung der betrachteten Zeitabschnitte.
Overview of the periods under consideration.

Datensatz	GRDC			Simulierte Zeitreihen					
Zeitabschnitt	1960–1989	1990–2019	1970–1999	2040–2069			2070–2099		
Bezeichnung	T1	T2	Hist	NF			FF		
RCP-Szenario				2.6	6.0	8.5	2.6	6.0	8.5

**Abbildung 5**

Temperaturänderung der mittleren simulierten Temperaturen für die nahe (NF)- und ferne Zukunft (FF) gegenüber den für den Referenzzeitraum, 1970 bis 1999, gemessenen Temperaturdaten des EOBS-Datensatzes (CORNES et al., 2018). Die simulierten Daten sind die Mittelwerte der Temperatur-Simulationsergebnisse der in dem ISI-MIP Projekt verwendeten fünf globalen Klimamodelle.

Temperature change in the mean simulated temperatures for the near and far future compared to the temperature data measured for the reference period, 1970 to 1999, of the E-OBS dataset (CORNES et al., 2018). The simulated data are the mean values of the temperature simulation results of the five global climate models used in the ISI-MIP project.

Da prewhitening neben der Entfernung der Autokorrelation auch zu einer Minderung der Steigung des Trends führt (BAYAZIT & ÖNÖZ, 2007), entwickelten YUE et al., (2002) den Ansatz der „trend-free-prewhitening procedure“ (TFPW), welcher im R-Paket: zyp (BRONAUGH et al., 2009) implementiert wurde. Dieser ursprüngliche Ansatz, inklusive des „zyp“ Algorithmus, kann aber zu einer erhöhten Zahl von falsch-positiven, also fälschlicherweise als signifikant deklarierten, Trends führen (BÜRGER, 2017). Die erforderliche Korrektur (Version 0.11) ist erst kürzlich erfolgt, konnte aber dieser Untersuchung bereits zu Gute kommen.

Der Ansatz verwendet außerdem den Mann-Kendall-Test, um die gegebene Messreihe auf einen monotonen, linearen Trend zu prüfen. Das Konzept des Signifikanztests ist das Einsetzen der Daten als Evidenz. Per Konvention wird in dieser Arbeit das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ angenommen.

Die Trendermittlung nach Sen basiert auf der Verwendung des Medians (SEN, 1968), weswegen der Sen's Slope Trend robuster gegenüber Ausreißern in der Datenreihe ist als die einfache lineare Regression. Wegen der auftretenden Extremereignisse in hydrologischen Zeitreihen ist ein robuster Ansatz für diesen Datensatz sinnvoll (HUXOL et al., 2007).

3.5 Unsicherheiten der Analyse

In dieser Auswertung werden zwei verschiedene Datensätze genutzt, die gemessenen GRDC-Daten und die modellierten

Daten. Die Abflusswerte der beiden Datensätze und damit auch die davon abgeleiteten Analyseergebnisse und die Unsicherheiten sind aufgrund von verschiedenen betrachteten Einflussfaktoren und Einzugsgebieten nicht direkt miteinander vergleichbar.

Bei der Auswertung der Ergebnisse der beobachteten Daten des GRDC-Datensatzes ist es wichtig zu betonen, dass die Abflüsse durch beispielsweise Abflusserhöhungen oder bauliche Veränderungen wie Talsperren oder Querbauwerke stark anthropogen beeinflusst sind. Daher lassen sich die Ergebnisse der Niedrigwasseranalyse der gemessenen GRDC-Daten nicht direkt auf den Klimawandel zurückführen. Im Gegensatz dazu sind in den modellierten Daten keine direkten anthropogenen Beeinflussungen enthalten. Da der GRDC-Datensatz aus gemessenen Daten besteht, können die Ergebnisse der Niedrigwasseranalyse auch durch Messungenauigkeiten beeinflusst sein.

Auch die Ergebnisse der Analyse der modellierten Daten sollten nur unter Betrachtung der Unsicherheiten interpretiert werden. Grundsätzlich stellen Modelle aufgrund von begrenzten Rechenkapazitäten oder begrenztem Prozessverständnis immer nur eine vereinfachte Darstellung der Realität dar. Eine Reduzierung der zeitlichen oder räumlichen Auflösung der Modelle oder der Komplexität des Problems auf die wesentlichen Einflussfaktoren kann die begrenzten Rechenkapazitäten kompensieren. Neben den vorgenommenen Vereinfachungen komplexer Prozesse führt auch die Tatsache, dass die Modellierungen für die Zukunft bis 2100 durchgeführt wurden, zu Unsicherheiten. Das liegt

unter anderem daran, dass die globale Emissionsentwicklung ungewiss ist, da politische Entscheidungen, technologische, demographische, ökonomische sowie soziale Entwicklungen die Treibhausgasentwicklungen und die Anpassungsfähigkeit der Gesellschaft an den Klimawandel beeinflussen. Auch das begrenzte Verständnis von Rückkopplungsmechanismen und bezüglich der Komplexität des Klimasystems führt zu Unsicherheiten der Klimaszenarien (WEIDLICH, 2020).

Um diese Unsicherheiten darzustellen, wurden in dieser Untersuchung drei RCP-Szenarien und ein Ensemble von fünf globalen Klimamodellen genutzt. Die verschiedenen Szenarien sollen eine Spannweite möglicher zukünftiger Klimaänderungen darstellen (WALKENHORST & MANFRED, 2009; WEIDLICH, 2020; ZHANG & ZWIERS, 2004).

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in zwei Schritten analysiert und präsentiert. Zunächst stehen die Ergebnisse der Analyse der gemessenen Abflussdaten aus dem GRDC-Datensatz im Vordergrund. Anschließend folgen die Ergebnisse der Niedrigwasseranalyse der modellierten Daten bis zum Jahr 2100.

4.1 Analyse gemessener Zeitreihen

4.1.1 Auswertung des NM7Q-Trends

Um die Ergebnisse der Analyseumgebung vorzustellen, werden in dieser Arbeit beispielhaft die langjährigen NM7Q-Trends der Stationen Kleinheubach am Main, Cochem an der Mosel und Rockenau Ska am Neckar ausgewertet (Tab. 3, Abb. 6). Die berechneten Steigungen der Linearen Regression und der Sen's Slope Trends zeigen, dass die Entwicklung der NM7Q-Werte in keinem der betrachteten Einzugsgebiete eine deutliche Entspannung oder Verschärfung der Niedrigwassersituation anzeigt. Alle drei Kendall's-P-Werte sind größer als α und die Sen's Slope Trends sind somit nicht signifikant. An der Moselstation Cochem ist der Sen's Slope Trend negativ, während der mit Hilfe der linearen Regression berechnete positiv ist.

4.1.2 Niedrigwasserperioden und Zeitscheibenvergleich

Die Auswertung der Q_{90} -Niedrigwasserperioden erfolgt für das hydrologische Extremjahr 2018/2019 (Abb. 7 (A), Tab. 4). Der Schwellenwert wurde im November 2018 sowie in den Monaten von Juli bis Oktober 2019 unterschritten. Insgesamt lag der quantilbasierte Wert an allen drei betrachteten Flüssen häufiger als im langjährigen Durchschnitt, also an mehr als 10 % der Tage, unter dem Schwellenwert. Dabei trat diese Unterschreitung am Main

Tabelle 3

Zusammenfassung langjähriger NM7Q-Trends der Stationen Kleinheubach am Main, Cochem an der Mosel und Rockenau Ska am Neckar.
Summary of long-term NM7Q trends at the stations Kleinheubach on the Main, Cochem on the Moselle and Rockenau Ska on the Neckar.

Fluss	Lineare Regression Steigung in $\frac{\frac{m^3}{s}}{Jahr}$	Sen's Slope Trend Steigung in $\frac{\frac{m^3}{s}}{Jahr}$	Kendall's P-Wert $\alpha = 0.05$
Main	0,09	0,256	0,383
Mosel	0,005	0,096	0,652
Neckar	0,406	0,177	0,215

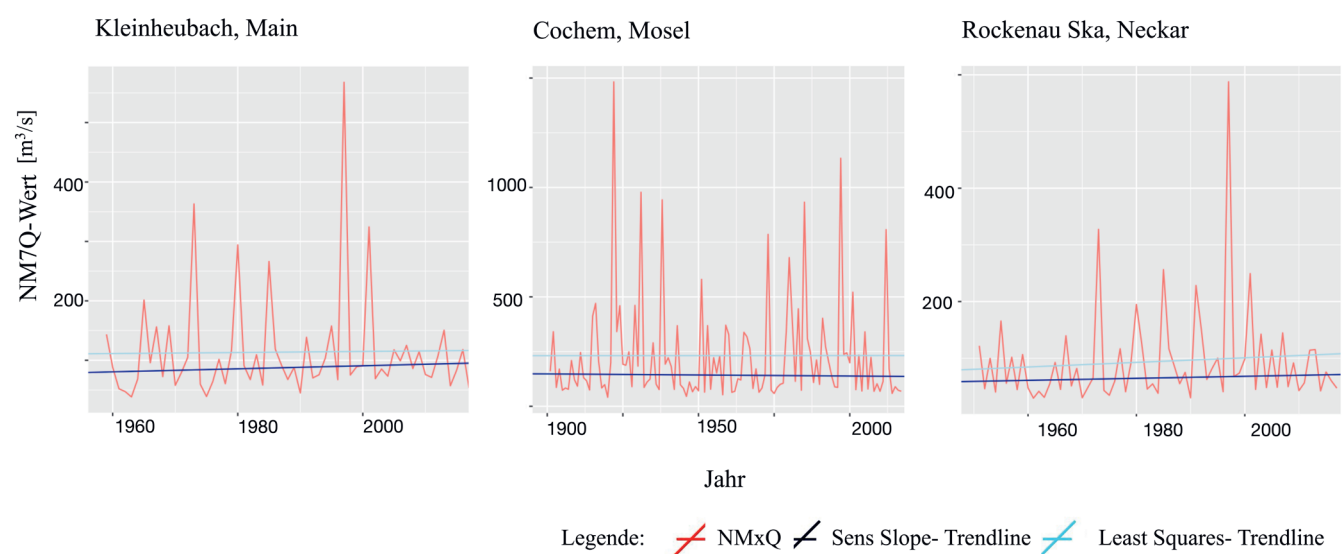


Abbildung 6

Langjährige NM7Q-Trends der Stationen Kleinheubach am Main, Cochem an der Mosel und Rockenau Ska am Neckar. Abbildung wurde mit der Webanwendung Low Flow Analysis erstellt. Basierend auf dem GRDC Datensatz.
Long-term NM7Q trends at the stations Kleinheubach on the Main, Cochem on the Moselle and Rockenau Ska on the Neckar. Figure was created with the web application Low Flow Analysis. Based on the GRDC dataset.

Tabelle 4 Analyse von Niedrigwasserperioden im hydrologischen Jahr 2018/2019. Niedrigwasser wird in dieser Darstellung quantilbasiert definiert. Alle Durchflüsse, die kleiner sind als das Q90-Perzentil des gesamten Datensatzes, werden als Niedrigwasserereignis definiert. <i>Analysis of low flow periods in the hydrological year 2018/2019. Low flow is defined quantile-based in this analysis. All discharges that are lower than the Q90 percentile of the entire data set are defined as low flow events.</i>			
Fluss	Main	Mosel	Neckar
Station	Kleinheubach	Cochem	Rockenau Ska
Q90-Grenzwert $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$	59,9	73,2	44,8
Mittlerer Abflusswert $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$	163,17	312,27	134,71
Summe der Tage unter Grenzwert	98	78	69
Längste Niedrigwasserperiode [Tage]	31	17	25

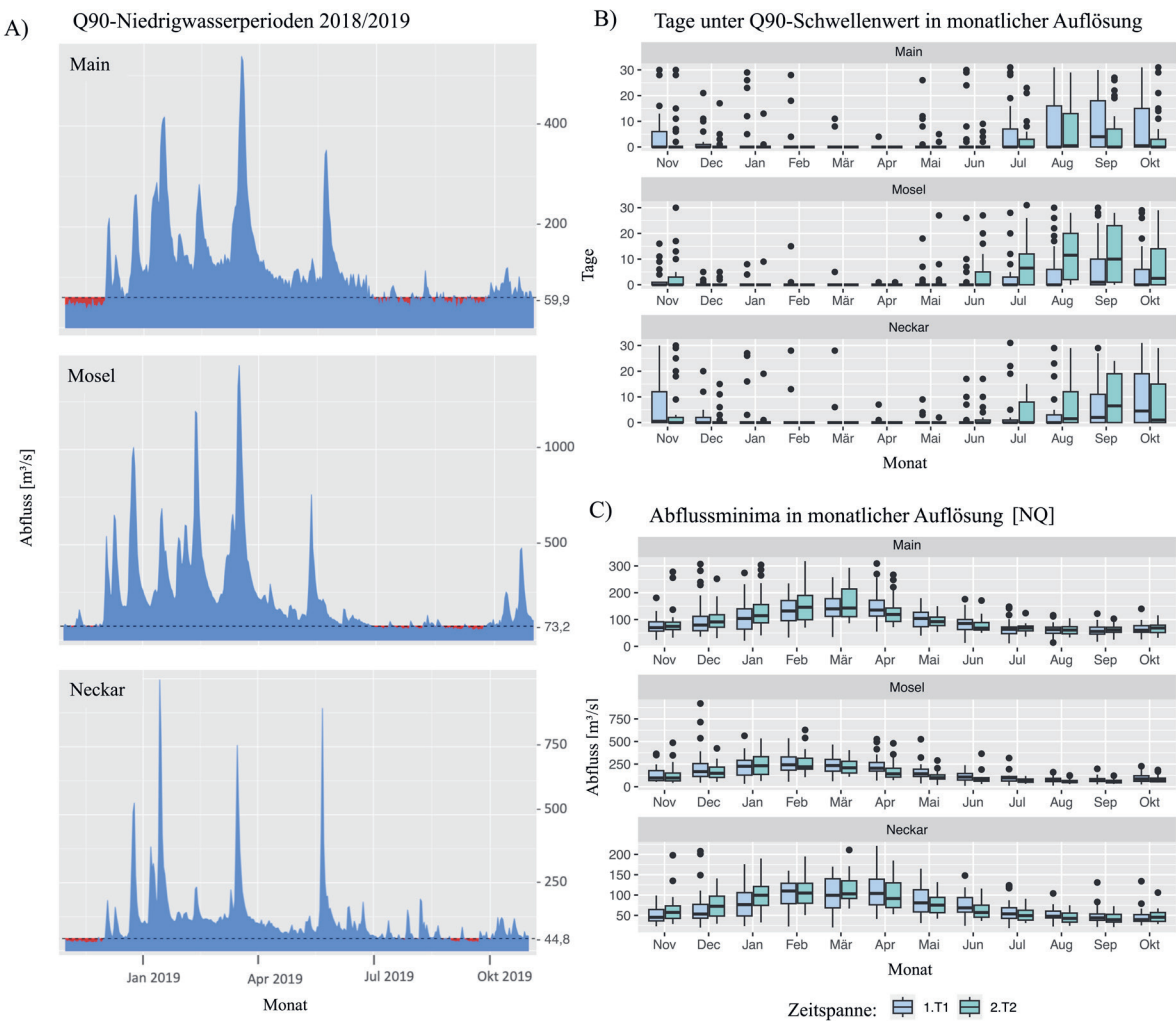


Abbildung 7
(A) Niedrigwasserperioden in dem hydrologischen Jahr 2018/2019 an den Stationen Kleinheubach am Main, Cochem an der Mosel und Rockenau Ska am Neckar. In rot markiert sind die Zeitabschnitte, an denen Abflusswerte gemessen wurden, die unter dem Q₉₀-Schwellenwert des jeweiligen Flusses liegen (DQ₉₀). In blau der gemessene Abfluss. (B, C) Berechnete Niedrigwasserkennwerte in monatlicher Auflösung für den Zeitschritt T1 und T2. Die Punkte zeigen Ausreißer an, die außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands (IQR) von beiden Enden des Boxplots liegen. Basierend auf dem gemessenen GRDC Datensatz. Der Zeitraum „T1“ umfasst die Jahre 1960–1989 und „T2“ umfasst die Jahre 1990–2019.
(A) Low flow periods in the hydrological year 2018/2019 at the stations Kleinheubach on the Main, Cochem on the Moselle and Rockenau Ska on the Neckar. Marked in red are the periods in which discharge values were measured that are below the Q₉₀ threshold value of the respective river (DQ₉₀). The measured discharge is shown in blue. (B, C) Low flow parameters calculated in monthly resolution for the time steps T1 and T2. The dots indicate outliers that lie outside the 1.5-fold interquartile range (IQR) from both ends of the boxplot. Based on the measured GRDC data set. The period „T1“ includes the years 1960–1989 and „T2“ includes the years 1990–2019.

etwa 2,7-mal so häufig, an der Mosel etwa 2,1-mal so häufig und am Neckar etwa 1,9-mal so häufig auf wie im langjährigen Mittel der Messreihe (Tab. 4).

Um zu ermitteln, in welchen Monaten im langjährigen Durchschnitt Niedrigwassersituationen auftraten, fand eine Zeitscheibenanalyse der GRDC-Abflussdaten statt. Anhand der Auswertung der minimalen Abflusswerte (NQ) und der Summe der Tage unter dem Q_{90} -Schwellenwert (DQ_{90}) wird deutlich, dass Niedrigwassersituationen hauptsächlich in den Monaten Juli bis Oktober auftreten (Abb. 7 B), (C)).

Die Gegenüberstellung der Zeitspannen T1 und T2 in monatlicher Auflösung deutet keine Abnahme der Abflussminima (NQ), jedoch eine zunehmende Häufigkeit (DQ_{90}) von Niedrigwassersituationen im Juli, August und September an der Mosel und am Neckar an. Im Gegensatz dazu lässt sich am Main eine abnehmende Tendenz von T1 zu T2 feststellen.

Am Ende der Niedrigwasserperiode, im November, treten an allen drei Flüssen durchschnittlich weniger Niedrigwassersituationen in T2 als in T1 auf. Es zeigt sich eine Verschiebung der am stärksten von Niedrigwasser betroffenen Monate in Richtung des Beginns der Niedrigwasserperiode.

Im Anschluss an diese Ergebnisse der Niedrigwasseranalyse, die auf den gemessenen GRDC-Zeitreihen basierte, folgt nun die Auswertung modellierter Abflusszeitreihen.

4.2 Analyse modellierter Daten

4.2.1 Zeitscheibenvergleich

Die Auswertung der modellierten Zeitreihen erfolgt anhand der Gegenüberstellung von drei Zeitscheiben: der Vergangenheit (Hist), der „nahen“ (NF) und der „fernen Zukunft“ (FF).

Die Analyse des DQ_{90} -Niedrigwasserkennwertes (Abb. 8, links) ermöglicht es, Aussagen über die Häufigkeit und/oder Länge von Niedrigwassersituationen zu treffen. Unabhängig von dem betrachteten Fluss oder Szenario treten Niedrigwasserbedingungen in der „nahen Zukunft“ (NF) häufiger auf als in der Vergangenheit (Hist) (Abb. 8, rechts). Deutlich weniger homogen und stark abhängig von dem betrachteten RCP-Szenario sind die prognostizierten Entwicklungen für das Zeitfenster der „fernen Zukunft“ (FF). Für das Szenario RCP2.6 (Abb. 8 1.A) werden die DQ_{90} -Werte bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur Prognose für die „nahe Zukunft“ voraussichtlich abnehmen. Im Gegensatz dazu steigen die DQ_{90} -Werte für die Szenarien RCP6.0 und RCP8.5 weiter an (Abb. 8 2.A, Abb. 8 3.A).

Neben der allgemeinen Tendenz einer Zu- oder Abnahme der Niedrigwassertage lässt sich für das RCP6.0 und das RCP8.5 auch eine Verschiebung der Monate erkennen, die am meisten von Niedrigwasser betroffen sind. Die maximalen DQ_{90} -Werte für das Szenario RCP6.0 treten für den „fernen Zukunft“-Zeitraum voraussichtlich im Oktober ein, während sie für den „nahe Zukunft“-Zeitraum an allen Flüssen voraussichtlich im September zu erwarten sind. Außerdem ist eine Verlängerung der Niedrigwasserperiode im Jahr zu erkennen, da sowohl in der „nahen“ als auch in der „fernen Zukunft“ vermehrt im Juli und November Abflüsse unter dem Q_{90} -Schwellenwert liegen. Diese Verschiebung wird unter dem RCP2.6 voraussichtlich nicht eintreten (Abb. 8, links).

Die Betrachtung der minimalen Abflusswerte erlaubt es, Rückschlüsse über die Intensität von Niedrigwassersituationen zu ziehen. Unabhängig von dem betrachteten Szenario lässt sich weder für den Zeitraum „nahe Zukunft“, 2040 bis 2069, noch für die „ferne Zukunft“, 2070 bis 2099, eine Zu- oder Abnahme der sommerlichen monatlichen Abflussminima gegenüber der Vergangenheit erkennen (Abb. 8, rechts). In den Monaten außerhalb der Niedrigwassersaison, Dezember bis Juni, nehmen die monatlichen Abflussminima von der Vergangenheit (Hist), über die „nahe Zukunft“ bis zur „fernen Zukunft“ für alle drei betrachteten Szenarien zu (Abb. 8, rechts).

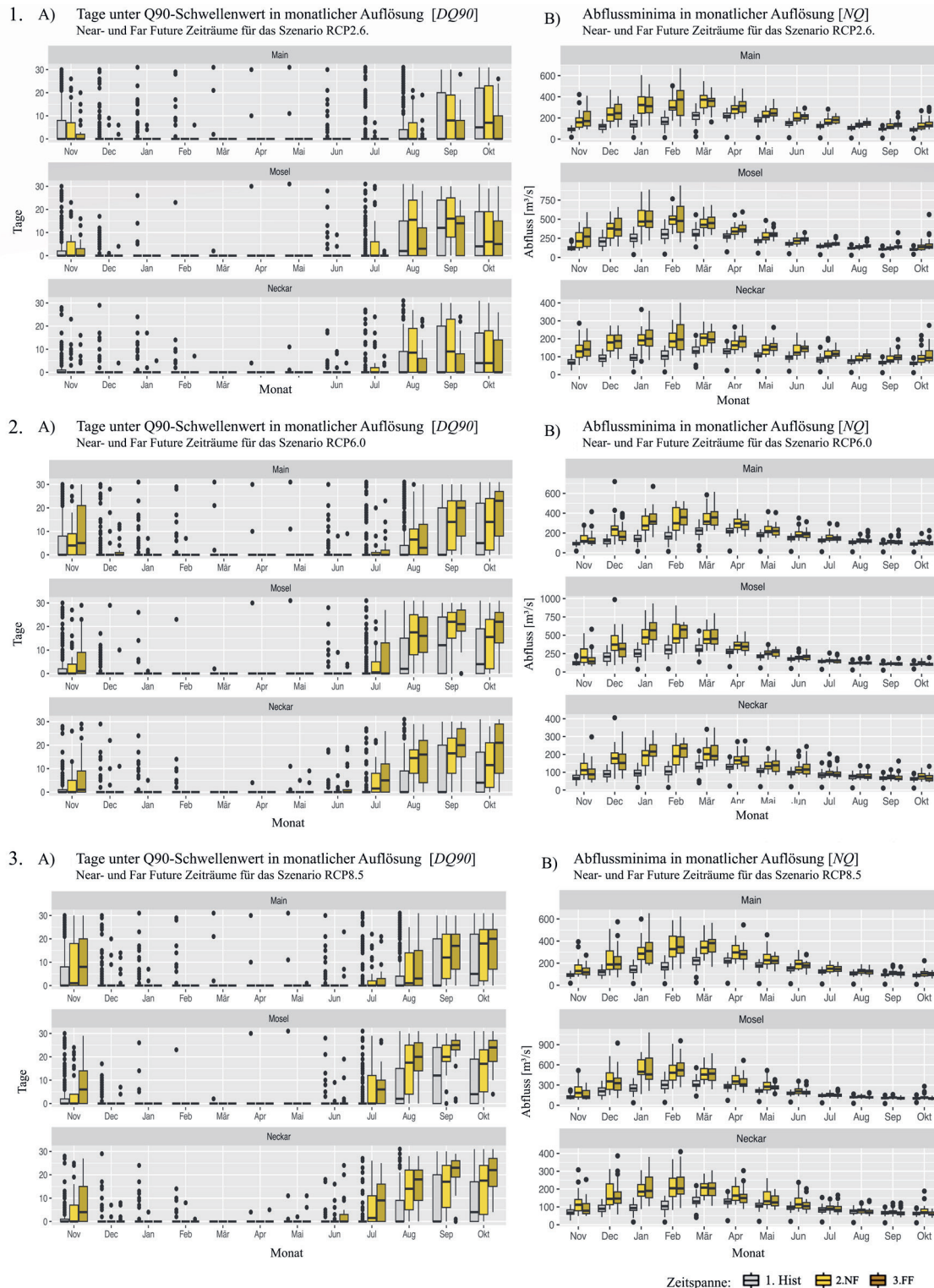
4.2.2 Vergleich der simulierten Niedrigwasserentwicklung in naher und ferner Zukunft in jährlicher Auflösung

Neben der Analyse in monatlicher Auflösung wurden die Kennwerte auch in Jahresauflösung, mit Bezug auf die hydrologischen Jahre, bestimmt und in Abbildung 9 für die Zeitscheiben des historischen Zeitraums, die „nahe“ und die „ferne Zukunft“ visualisiert. Die für die drei Flüsse und die „nahe“ und „ferne Zukunft“ berechneten Abflussmittelwerte unterscheiden sich für keines der betrachteten Szenarien signifikant von den historischen Abflussmittelwerten (Abb. 9 oben, Tab. 5). Für den Zeitraum „ferne Zukunft“ werden die Medianwerte der mittleren Abflüsse aller drei Flüsse von dem RCP2.6 Szenario über das RCP6.0 bis zu dem RCP8.5 geringer.

Der Vergleich der NM_7Q -Werte (Abb. 9 Mitte und Tab. 5) zwischen der Vergangenheit und der „nahen Zukunft“ deutet für alle drei Flüsse und Szenarien eine Abnahme der NM_7Q -Werte an, also eine Intensivierung der Niedrigwassersituation. Im Szenario „ferne Zukunft“ nehmen bis zum Ende des Jahrhunderts die NM_7Q -Werte für das RCP6.0 und das RCP8.5 an allen drei Flüssen weiter ab, wobei diese Abnahme gegenüber der Vergangenheit sowohl für das RCP6.0 als auch für das RCP8.5 an Mosel und Neckar statistisch signifikant ist. Das Ergebnis der Analyse unter Berücksichtigung des RCP2.6 zeigt, dass die NM_7Q -Werte für die „ferne Zukunft“ an den drei Flüssen höher sein werden als die für die „nahe Zukunft“ prognostizierten Werte. Dies deutet darauf hin, dass sich die Niedrigwassersituation unter dem Szenario RCP2.6 langfristig entschärfen würde.

Die Auswertung des DQ_{90} -Medianwerts in jährlicher Auflösung (Abb. 9, unten und Tab. 5) zeigt analog zu der Auswertung monatlicher Kennwerte (Abb. 8), dass für alle betrachteten Emissionsszenarien in „naher Zukunft“ an allen drei Flüssen höhere DQ_{90} -Werte und damit häufiger und/oder länger auftretende Niedrigwasserereignisse als im historischen Zeitraum zu erwarten sind, wobei diese Unterschiede allerdings statistisch nicht signifikant sind.

Die für die „ferne Zukunft“ berechneten DQ_{90} -Werte für die RCP6.0- und RCP8.5-Szenarien ergeben an allen drei Flüssen eine weitere Zunahme der Niedrigwassertage gegenüber der „nahen Zukunft“ und eine statistisch signifikante Zunahme der Tage im Vergleich zum historischen Zeitraum. Die für die „ferne Zukunft“ berechneten DQ_{90} -Werte für das RCP2.6-Szenario ergeben dagegen eine – nicht signifikante – Abnahme der DQ_{90} -Werte im Vergleich zur „nahen Zukunft“. Insgesamt zeigt die Analyse, dass die Niedrigwasserentwicklung in der betrachteten Region bis zum Ende des Jahrhunderts stark von der Emissionsentwicklung abhängt.

**Abbildung 8**

A) Gegenüberstellung der mittleren monatlichen Summe der Tage unter dem Q_{90} -Schwellenwert (DQ_{90}) in drei Zeitabschnitten – Vergangenheit (Hist), nahe Zukunft (NF) und ferne Zukunft (FF) – für die RCP-Szenarien 2.6, 6.0 und 8.5. (B) Gegenüberstellung der mittleren monatlichen Abflussminima in drei Zeitabschnitten – Vergangenheit (Hist), nahe Zukunft (NF) und ferne Zukunft (FF) – für die RCP-Szenarien 2.6, 6.0 und 8.5. Die Punkte zeigen die Ausreißer an, die als Werte definiert sind, die außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands (IQR) von beiden Enden der Box liegen. Die verwendeten Daten sind simulierte Daten, basierend auf der Modellierung von ROTTLE et al. (2021). Der Zeitraum „Hist“ umfasst die Jahre 1970–1999, der Zeitraum „NF“ die Jahre 2040–2060 und „FF“ die Jahre 2070–2099.

(A) Comparison of the mean monthly sum of days below the Q_{90} threshold (DQ_{90}) in three time periods – past (Hist), near future (NF) and far future (FF) – for the RCP scenarios 2.6, 6.0 and 8.5. (B) Comparison of the mean monthly runoff minima in three time periods – past (Hist), near future (NF) and far future (FF) – for the RCP scenarios 2.6, 6.0 and 8.5. The dots indicate the outliers, which are defined as values that lie outside the 1.5-fold interquartile range (IQR) from both ends of the box. The data used are simulated data based on the modeling of ROTTLE et al. (2021). The period „Hist“ covers the years 1970–1999, the period „NF“ the years 2040–2060 and „FF“ the years 2070–2099.

Tabelle 5

Die Medianwerte der Niedrigwasserkennwerte (aus Abbildung 7) für die drei Zeitabschnitte (Hist, NF und FF) in jährlicher Auflösung. Es wurden hier nur die Simulationen für das RCP6.0-Szenario berücksichtigt.

The median values of the low flow parameters (from Figure 7) for the three time periods (Hist, Nf and FF) in annual resolution. Only the simulations for the RCP6.0 scenario were considered.

	Main			Mosel			Neckar		
Zeitraum	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF
Abflussmittel [m³/s]	292	283	279	418	394	388	210	202	192
NM7Q [m³/s]	121	109	98	134	118	104	81	74	63
Q90SumD [Tage]	18	37	67	30	54	74	23	49	77

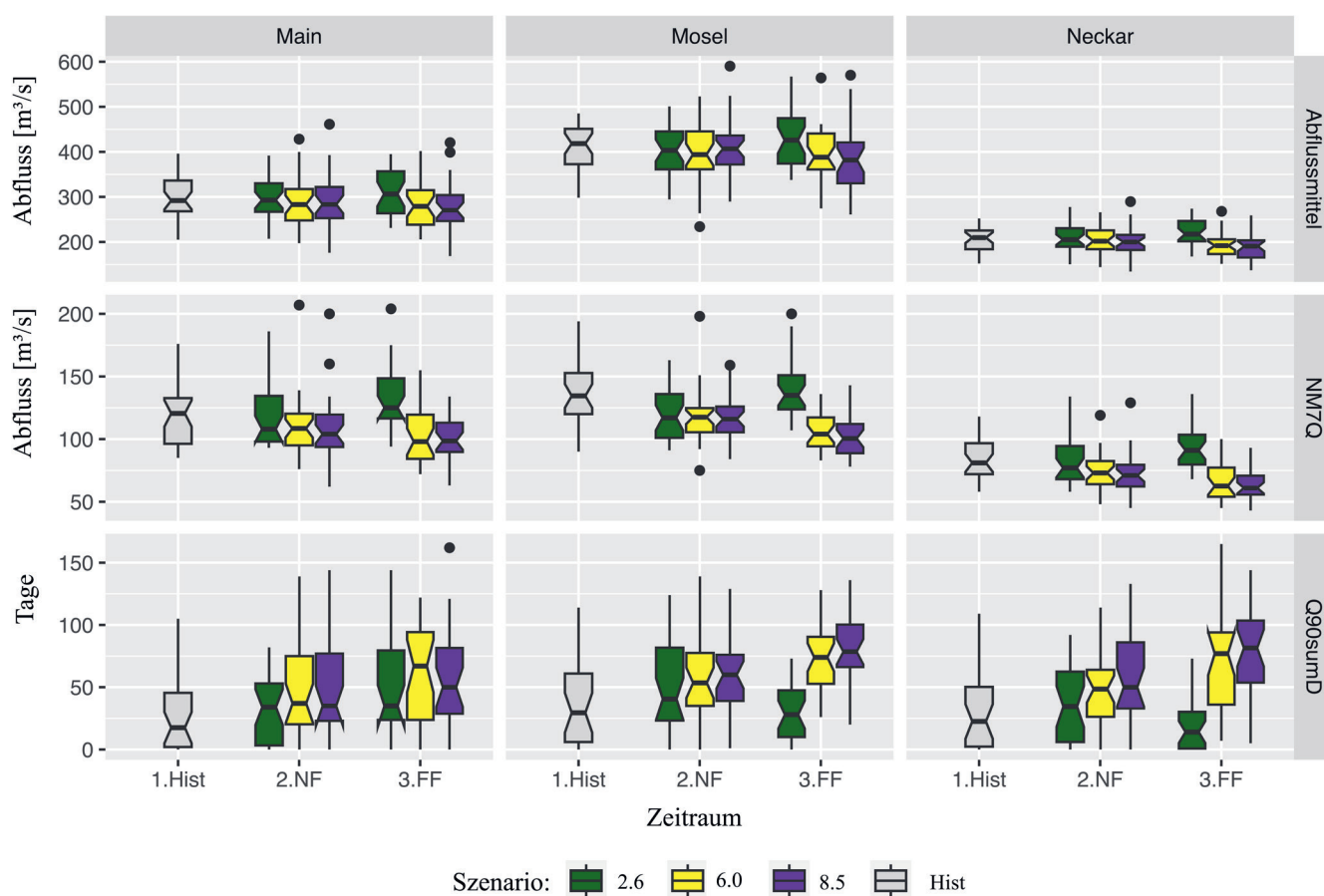


Abbildung 9

Vergleich der Abfluss- und Niedrigwasserentwicklung des Mains, der Mosel und des Neckars für drei verschiedene Zeiträume: Vergangenheit (Hist), nahe Zukunft (NF) und ferne Zukunft (FF). Gegenüberstellung der drei betrachteten RCP-Szenarios. Die Punkte zeigen die Ausreißer an, die als Werte definiert sind, die außerhalb des 1,5-fachen des Interquartilsbereichs (IQR) von beiden Enden der Box liegen. Die Kerben markieren ein Konfidenzintervall um den Median, das auf dem Median $\pm 1,58 \cdot \text{IQR} / \sqrt{n}$ basiert. Kerben werden verwendet, um Gruppen zu vergleichen: Wenn sich die Kerben zweier Boxen nicht überschneiden, ist dies ein starker Hinweis darauf, dass sich die Mediane signifikant unterscheiden. Die verwendeten Daten sind simulierte Daten, basierend auf der Modellierung von RÖTTLER et al. (2021). Der Zeitraum „Hist“ umfasst die Jahre 1970–1999, der Zeitraum „NF“ die Jahre 2040–2060 und „FF“ die Jahre 2070–2099.

Comparison of the discharge and low flow development of the Main, Moselle and Neckar rivers for three different time periods: past, near future (NF) and far future (FF). Comparison of the three RCP scenarios analyzed. The points indicate the outliers, which are defined as values that fall outside 1.5 times the interquartile range (IQR) from either end of the box. The notches display a confidence interval around the median which based on the median $\pm 1.58 \cdot \text{IQR} / \sqrt{n}$. Notches are used to compare groups; if the notches of two boxes do not overlap, this is strong evidence that the medians differ significantly. The data used are simulated data based on the modeling of RÖTTLER et al. (2021). The period „Hist“ covers the years 1970–1999, the period „NF“ the years 2040–2060 and „FF“ the years 2070–2099.

5 Diskussion

In der folgenden Diskussion werden zunächst die Ergebnisse der Analyse der gemessenen GRDC-Daten und anschließend die der modellierten Abflusszeitreihen präsentiert.

Die Ermittlung des NM7Q-Trends der GRDC-Messreihen zeigt keine signifikanten Trends in den betrachteten Einzugsgebieten. Das Ergebnis wird durch OESTERMANN & MUDERSBACH (2021) bestätigt, die für eine deutschlandweite Analyse nicht schwellenwertbasierter Niedrigwasserkennwerte kaum signifikante Niedrigwassertrends feststellten. Auch der Monitoringbericht des Umweltbundesamtes (UBA, 2019) bestätigt die Aussage, dass anhand der Trendanalyse der gemessenen, langfristigen Abflusszeitreihen keine Verschärfung der Niedrigwassersituation erkennbar ist.

Auch der NQ-Kennwert deutet keine Abnahme der minimalen Abflusswerte in den gemessenen Zeitreihen an. Diese Beobachtung lässt sich durch die künstliche Abflusserhöhung erklären.

Wird jedoch die Anzahl der Niedrigwassertage analysiert (DQ_{90}) zeigt sich, dass bereits bis zum Jahr 2019 die Häufigkeit von Niedrigwassertagen an allen untersuchten Flüssen zugenommen hat. Die Auswertung des Niedrigwasserkennwerts DQ_{90} bestätigt die Ergebnisse von OESTERMANN & MUDERSBACH (2021), dass die schwellenwertbasierten Kennwerte häufiger oder länger auftretende Niedrigwasserperioden über die gemessenen Zeitreihen andeuten. Diese Ergebnisse erscheinen plausibel im hydrologischen Kontext, da mit steigenden Temperaturen die Verdunstungsrate zunimmt, was häufiger oder länger auftretende Niedrigwassersituationen begünstigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass es in den Jahren von 1990 bis 2019 mehr Niedrigwassersituationen gab als in dem Zeitabschnitt von 1960 bis 1989, diese jedoch nicht durch niedrigere minimale Pegelstände gekennzeichnet waren als die historischen Situationen.

Die Darstellung der Niedrigwasserkennwerte in monatlicher Auflösung eignet sich, um die Saisonalität und die Änderung in der Saisonalität von Niedrigwasser zu erkennen. Dabei muss aber die Analyse der gemessenen GRDC-Abflussdaten unter dem Vorbehalt betrachtet werden, dass alle drei betrachteten Gewässer klar kontrolliert sind und der Neckar und der Main jährlich Überleitungen aus anderen Einzugsgebieten erhalten (BELZ et al., 2007). Diese Regulierungen haben potenziell einen starken Einfluss auf die Niedrigwasserkennwerte, insbesondere auf die minimalen Abflüsse NQ. Durch die dafür benötigten Bauwerke wie Wehre, Staustufen und Schleusen und durch das Abflussmanagement sind generell keine direkten Verknüpfungen zwischen den beobachteten Trends oder Niedrigwasserentwicklungen und dem Klimawandel möglich.

Solche Einflüsse waren in den Simulationen und damit in den modellierten Daten nicht inbegriffen. Dennoch müssen die Ergebnisse der Analyse der modellierten Abflussdaten unter Berücksichtigung der hohen Unsicherheit (BRONSTERT et al., 2007) der für die künftig zu erwartenden regionalen Klimabedingungen (Klimaszenarien) modellierten Abflussdaten bewertet werden. Dafür wurden die Kennwerte in dieser Analyse für verschiedene Szenarien bestimmt. Die Analyse der einzelnen Szenarien

erlaubt es nicht, eine Prognose mit quantitativen Angaben zur Eintrittswahrscheinlichkeit zu erstellen. Sie lässt lediglich Rückschlüsse auf die Sensitivität des hydrologischen Regimes des jeweiligen betrachteten Flusses bis 2100 zu.

Die Ergebnisse der Analyse der simulierten Abflüsse in den pluvial geprägten Zuflüssen des Rheins zeigen einen klaren Zusammenhang zwischen der regionalen Erwärmung und einer Häufung der Tage mit Niedrigwasserbedingungen bis 2100. Sie bestätigen so die Analyseergebnisse von HUANG et al. (2015). Die bereits für die Zeiträume T1 und T2 bestimmte Steigerung der Tage unter dem Q_{90} -Schwellenwert wird in der „nahen Zukunft“ an allen betrachteten Flüssen weiter zunehmen.

Wie erwartet ist der Unterschied zwischen den einzelnen Szenarien für die „nahe Zukunft“ geringer als für die „ferne Zukunft“. Die Analyseergebnisse für das RCP6.0- und RCP8.5-Szenario weisen auf eine weitere Verschärfung der Niedrigwassersituation in der „fernen Zukunft“ im Vergleich zur „nahen Zukunft“ hin. Im Gegensatz dazu deuten die für das RCP2.6 berechneten Kennwerte eine Entspannung der Niedrigwassersituation für die „ferne Zukunft“ im Vergleich zu der „nahen Zukunft“ an. Die Gegenüberstellung demonstriert deutlich, dass die Effekte von CO_2 -Einsparungen schon bis 2100 in der Niedrigwasserstatistik erkennbar sind.

Der steigende DQ_{90} -Wert, der zusammen mit dem abnehmenden NM7Q-Wert und dem unveränderten NQ-Wert für die Szenarien RCP6.0 und RCP8.5 bis zum Ende des Jahrhunderts zu erwarten ist, deutet in dieser Kombination darauf hin, dass Niedrigwasserperioden in Zukunft häufiger und länger auftreten werden. In diesem Zusammenhang sind über mehrere Tage hinweg minimale Abflusswerte zu erwarten.

Die Analyse in monatlicher Auflösung ermöglicht es, Aussagen über die Entwicklung der Niedrigwassersaison zu treffen. Für das RCP6.0- und das RCP8.5-Szenario werden in der „fernen Zukunft“ die Monate, die am meisten von Niedrigwasser betroffen sind, später im Jahr liegen. Die Zeit im Jahr, in der Niedrigwasser auftreten, wird sich verlängern. Gleichzeitig werden minimalen Niedrigwasserwerte [NQ] in den Wintermonaten zukünftig im Gegensatz zu der Vergangenheit zunehmen. Diese Beobachtung bestätigt, die Ergebnisse, die in der Bestandsaufnahme zu den Themen Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung vom Umweltbundesamt (BRASSEUR et al., 2017; BRIENEN et al., 2013; RIEDEL et al., 2021) zusammengefasst wurden. Eine interessante Fragestellung für zukünftige Arbeiten wäre, welche Faktoren diese saisonale Verschiebung begünstigen.

Anhand der saisonalen Niedrigwasseranalyse der modellierten Zeitreihen wird deutlich, dass die höheren jährlichen DQ_{90} -Werte zwei Ursachen haben: Einerseits treten öfter und/oder länger Niedrigwasserperioden auf und andererseits verlängert sich der Teil des Jahres, in dem Niedrigwasser auftreten.

Analog zum Monitoringbericht des Umweltbundesamtes (UBA, 2019) deuten auch die Ergebnisse dieser Analyse eine Zunahme der Niedrigwassertage im Sommer in „naher Zukunft“ an. Diese hängt vermutlich sowohl mit den steigenden Verdunstungsraten als auch mit den für das Sommerhalbjahr projizierten, abnehmenden Niederschlägen zusammen (UBA, 2019). Dabei sinken die minimalen, zu erwartenden monatlichen Abflüsse in den Sommermonaten jedoch nicht. In den Monaten von Dezember

bis Juni erhöhen sich die monatlichen Abflussminima von der Vergangenheit über die „nahe Zukunft“ bis zur „fernen Zukunft“ für alle drei betrachteten Szenarien. Mögliche Ursachen hierfür könnten zunehmende Niederschläge in den Wintermonaten und früher oder vermehrt schmelzender Schnee sein.

Die hier vorgestellte Niedrigwasseranalyse und die open-source Analyseumgebung, bestehend aus dem R-Paket und der Webanwendung, ließe sich durch die Ergänzung weiterer Niedrigwasserkennwerte erweitern und verbessern. Mithilfe von Analyseumgebungen wie Istat (HÜLSMANN & KLING, 2022) können auch weitergehende Analysen durchgeführt werden. Darauf aufbauend sind auch Risikoanalysen zu Niedrigwasserabflüssen möglich, bestehend aus den Auftretenswahrscheinlichkeiten und der Identifikation möglicher Auswirkungen auf die regionale Natur, Bevölkerung und Wirtschaft.

Die hier vorgestellten Erkenntnisse sind von großer Bedeutung für die Entwicklung regionaler Klimaanpassungsstrategien im Wassermanagement. Die häufiger auftretenden Niedrigwassersituationen ereignen sich in den Monaten mit dem höchsten Wasserbedarf, was zukünftig zu vermehrten Interessenkonflikten in der betrachteten Region führen wird. Die zunehmenden Herausforderungen des Klimawandels wirken sich besonders im Hinblick auf hydrologische Veränderungen regional unterschiedlich aus und erfordern gezielte Anpassungen durch Politik und Wirtschaft auf lokaler Ebene.

6 Zusammenfassung

Die Analyse zukünftiger Niedrigwassersituationen ist entscheidend für die Binnenschifffahrt, Energiewirtschaft, Gewässerökologie und das regionale Wassermanagement. Ziel dieser Arbeit war es, die Häufigkeit, Intensität und Dauer von Niedrigwasserperioden in den Einzugsgebieten der drei größten Nebenflüsse des Rheins anhand gemessener und modellierter Daten zu quantifizieren und zu vergleichen. Zunächst wurden historische Daten ausgewertet, gefolgt von der Analyse modellierter Daten bis 2100 zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen.

Die langjährigen Trends der NM₇Q-Werte der gemessenen Abflussdaten zeigen keine Änderung der Niedrigwasserdynamik an. Auch die monatlichen Abflussminima (NQ) geben keine Verschärfung der Niedrigwassersituation wieder, weder im Vergleich gemessener, historischer Zeitabschnitte noch in der Gegenüberstellung der modellierten Zeitreihen für die „nahe“ und „ferne Zukunft“.

Im Gegensatz dazu deutet sowohl die Auswertung der GRDC-Messreihen als auch die Auswertung der modellierten Abflusszeitreihen auf eine bereits beobachtbare und für die „nahe Zukunft“ voraussichtlich weiter anhaltende Zunahme der Tage unter dem Q₉₀-Schwellenwert für alle untersuchten Flüsse und Szenarien hin. Die saisonale Niedrigwasseranalyse zeigt, dass die Zunahme der Niedrigwassertage (DQ₉₀) sowohl auf häufigere und/oder längere Niedrigwasserperioden zurückzuführen ist als auch auf eine erweiterte Zeitspanne im Jahr, in der Niedrigwasserbedingungen auftreten.

Für die „ferne Zukunft“ werden Unterschiede zwischen den Szenarien deutlich. Das RCP2.6-Szenario zeigt für die „ferne Zukunft“

eine Entspannung der Niedrigwassersituation im Vergleich zur „nahen Zukunft“, während das RCP6.0 und das RCP8.5 eine weitere Verschärfung für das Ende des Jahrhunderts prognostizieren. Abnehmende NM₇Q-Werte in Kombination mit steigenden DQ₉₀-Werten und unveränderten NQ-Werten deuten auf häufigere und/oder längere Niedrigwasserperioden hin, in denen an mehreren Tagen hintereinander minimale Abflusswerte auftreten.

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, dass die Niedrigwasserentwicklung der drei größten Nebenflüsse des Rheins bis zum Jahr 2100 stark von der Emissionsentwicklung abhängt. Die Auswertung der künftigen Bedingungen zwischen 2070 und 2099 veranschaulicht, dass klimapolitische Entscheidungen von heute, ausgedrückt durch die verschiedenen Pfade der RCP-Szenarien, einen erheblichen Einfluss auf zukünftige Niedrigwassersituationen im Rheineinzugsgebiet haben.

Conclusion

The analysis of future low flow situations is crucial for inland shipping, the energy industry, water ecology and regional water management. The aim of this work was to quantify and compare the frequency, intensity and duration of low flow periods in the catchment areas of the three largest tributaries of the Rhine using measured and modeled data. First, historical data was evaluated, followed by the analysis of modeled data up to 2100 to estimate future developments.

The long-term trends of the NM₇Q values of the measured discharge data show no change in the low flow dynamics. The monthly discharge minima (NQ) also show no intensification of the low flow situation, neither in the comparison of measured, historical time periods nor in the comparison of the modeled time series for the “near” and “far future”.

In contrast, both the evaluation of the GRDC measurement series and the evaluation of the modeled discharge time series show an increase in the number of days below the Q₉₀ threshold for all rivers and scenarios investigated, which is already observable and is forecast to continue in the “near future”. The seasonal low flow analysis shows that the increase in low flow days (DQ₉₀) is due to both more frequent and/or longer low flow periods and to an extended period of the year in which low flow conditions occur.

Differences between the scenarios become evident for the distant future. The RCP2.6 scenario shows a relaxation of the low flow situation for the “far future” compared to the “near future”, while RCP6.0 and RCP8.5 predict a further intensification until the end of the century (2070 to 2099). Decreasing NM₇Q values in combination with increasing DQ₉₀ values and unchanged NQ values indicate more frequent and/or longer low flow periods in which minimum discharge values occur several days in a row.

The results of this study show clearly that the low flow development of the three largest tributaries of the Rhine up to the year 2100 is strongly dependent on the development of emissions. The evaluation of future conditions between 2070 and 2099 demonstrates that today's climate policy decisions, expressed by the different paths of the RCP scenarios, have a considerable influence on future low flow developments in the Rhine catchment.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die historischen Abflussdaten sind frei zugänglich und können beim Global Runoff Data Centre (GRDC) mit Sitz in 56068 Koblenz, Deutschland, angefordert werden. Detaillierte Informationen bezüglich der modellierten Daten sind in RÖTTLER et al. (2021) zu finden. Die Simulationsergebnisse können die Autoren auf Anfrage bereitstellen. Der Quellcode des hydrologischen Modells mHM v.5.10 steht unter SAMANIEGO et al. (2019) zur Verfügung. Der E-OBS Datensatz des Copernicus Climate Change Service ist frei zugänglich und kann in dem Copernicus Climate Data Store (CDS) heruntergeladen werden.

Danksagung

Wir danken dem GRDC für die Bereitstellung von Abflusszeitreihen in täglicher Auflösung. Zusätzlich möchten wir dem ISI-MIP-Projekt für die Bereitstellung der „Bias-korrigierten“ CMIP5-Klimamodelldaten unseren Dank ausdrücken sowie Luis Samaniego, Rohini Kumar und Stephan Thober für den Aufbau des mHM-Modells und die Durchführung des Downscalings der CMIP5-Datensätze. Außerdem bedanken wir uns beim EU-FP6-Projekt UERRA (<http://www.uerra.eu>), dem Copernicus Climate Change Service sowie den Datenanbietern im ECA&D-Projekt (<https://www.ecad.eu>) für die Zurverfügungstellung der hier verwendeten und zitierten Datensätze.

Anschriften der Verfasser

Mai-Britt Berghöfer
Prof. Dr. Axel Bronstert
Universität Potsdam
Institut für Umweltwissenschaften und Geographie
Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam
berghoefer@uni-potsdam.de
axel.bronstert@uni-potsdam.de

Dr. Erwin Rottler
Universität Innsbruck
Institut für Geographie
Innrain 52f, 6020 Innsbruck
erwin.rottler@uibk.ac.at

Literaturverzeichnis

- ADEMME, M., N. JANNSEN, S. KOOTHS, & S. MÖSLE (2019): „Niedrigwasser bremst Produktion.“ Wirtschaftsdienst, 79–80.
DOI: 10.1007/s10273-019-2399-7.
- BAYAZIT, M. & B. ÖNÖZ (2007): To prewhiten or not to prewhiten in trend analysis? – Hydrological Sciences Journal, 52(4), 611–624.
DOI: 10.1623/hysj.52.4.611.
- BELZ, J.U., G. BRAHMER, H. BUITEVELD, H. ENGEL, R. GRABHER, H. HODEL, P. KRAHE, R. LAMMERSEN, M. LARINA & H.G. MENDEL (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert: Analyse, Veränderungen, Trends. – Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, ISBN: 978-90-70980-33-7.
- BERGHÖFER, M., E. RÖTTLER & A. BRONSTERT (2022a): Ifanalyse. – GitHub. <https://github.com/maibrittbbergh/ifanalyse>.
- BERGHÖFER, M., E. RÖTTLER & A. BRONSTERT (2023): Ifanalyse. – Shiny Application. – MBSHine. <https://mbshine.shinyapps.io/ifanalyse/>.
- BERGHÖFER, M., E. RÖTTLER & A. BRONSTERT (2022b): Statistical Introduction. – GitHub. <https://github.com/maibrittbbergh/statisticalmanual/blob/main/statisticalintroduction.md>.
- BRASSEUR, G.P., D. JACOB & S. SCHUCK-ZÖLLER (2017): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. – Springer Nature.
- BRIENEN, S., A. KAPALA, H. MÄCHEL & C. SIMMER (2013): Regional centennial precipitation variability over Germany from extended observation records. – International Journal of Climatology, 33, 2167–2184.
- BRONAUGH, D., A. WERNER & D. BRONAUGH (2023): zyp. – CRAN Repository. DOI: 10.32614/CRAN.package.zyp.
- BRONSTERT, A., V. KOLOKOTRONIS, D. SCHWANDT & H. STRAUB (2007): Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example. – International Journal of Climatology, 10: 1579–1594.
DOI: 10.1002/joc.1621.
- BÜRGER, G., A. PFISTER & A. BRONSTERT (2021): Zunehmende Starkregenintensitäten als Folge der Klimaerwärmung: Datenanalyse und Zukunftsprojektion. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung: HyWa = Hydrology and water resources management, Germany/ Hrsg.: Fachverwaltungen des Bundes und der Länder, 262–271.
DOI: 10.5675/HyWa_2021.6_1.
- BÜRGER, G. (2017): On trend detection. Hydrological Processes, 31(22), 4039–4042.21.6_1.
- CHANG, W., J. CHENG, J.J. ALLAI, C. SIEVERT, B. SCHLOERKE, Y. XIE, J. ALLEN, J. MCPHERSON, A. DIEPERT & B. BORGES (2021): Shiny: Web Application Framework for R. – DOI: 10.32614/CRAN.package.shiny. Zugriff am 12.09.2024. <https://CRAN.R-project.org/package=shiny>.
- COP21 (2015): Adoption of the Paris Agreement. – United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.
- CORNES, R., G. VAN DER SCHIERER, E. VAN DEN BESSELAAR & P. JONES (2018): An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets. – JGR Atmospheres, 14.08: 9391–9409.
DOI: 10.1029/2017JD028200. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018JGRD..123.9391C/abstract>.
- DIN (1992): DIN 4049-1. – Hydrologisches Jahr, 12. Zugriff am 06. 07 2024. <https://www.din.de/de/meta/suche/62730!search?query=hydrologie>.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (2020): Nationaler Klimareport, Klima – Gestern, Heute und in der Zukunft. – Zugriff am 09.11.2023. https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf;jsessionid=FB973CD2CC2D432F8EB2377C037C5D76.live21073?__blob=publicationFile&v=15.
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D., M. HELMS, A. KLEINHANS, G. LAAHA, S. SCHÜMBERG, J. WALTHER & W. WILLEMS (2022): Merkblatt DWA-M 541 Statistische Analyse von Niedrigwasserkenngößen. – Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- FROST, I. (2018): Einfache lineare Regression: Die Grundlage für komplexe Regressionsmodelle verstehen. – Wiesbaden: Springer Fachmedien, DOI: 10.1007/978-3-658-19732-2_2.
- GRDC (2020): GRDC Data Download. – Zugriff am 08.09.2023. Available at: https://www.bafg.de/GRDC/EN/02_srvcs/21_tmsrs/210_prtl/tou.html?nn=2862854.
- GÜNTNER, A., F. FLECHTNER, S. BUITER, J. KUSCHE & P. BECKER (2023): Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie – Water storage changes in Germany since 2002 from satellite gravity observations. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 67(2), 72–73.

- HAYLOCK, M.R., N. HOFSTRA, A.M.G. KLEIN TANK, E.J. KLOK, P.D. JONES & M. NEW (2008): A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(30). DOI: 10.1029/2008JD010201.
- HEMPEL, S., K. FRIELER, L. WARSZAWSKI & J. SCHEWE (2013): Bias corrected GCM input data for ISIMIP Fast Track. – GFZ Data Services. Zugriff am 12.2023. Available at: <https://www.isimip.org/gettingstarted/fast-track-bias-correction/>.
- HUANG, S., V. KRYSANOVA & F. HATTERMANN (2015): Projections of climate change impacts on floods and droughts in Germany using an ensemble of climate change scenarios. – *Regional Environmental Change*, 15, 461–473. DOI: 10.1007/s10113-014-0606-z.
- HÜLSMANN, S., A. STEFANOVA, M. ADYKIEWICZ-PIRAGAS, I. LEJCUŚ & I. ZDRALEWICZ (2021): Niedrigwasser und Mindestwasserabflüsse. – Zugriff am 03.05.2024. Available at: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-2-866829>.
- HÜLSMANN, S. & H. KLING (2022): Ifstat. – Zugriff am 02.12.2023. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=Ifstat>. DOI: 10.32614/CRAN.package.Ifstat.
- HUXOL, S., A. LEIBUNDGUT & H. KÜLLS (2007): Trendanalyse von Zeitreihen der Komponenten des Wasserkreislaufes im Einzugsgebiet der Dreisam zur prozessorientierten Beurteilung hydrologischer Klimafolgen. – Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.
- IKSR (2020): Internationale Kommission zum Schutz des Rheins Bericht zum Niedrigwasserereignis Juli-November 2018. – Bericht Nr. 263. 56068 Koblenz.
- IONITA, M., V. NAGAVCIUC, R. KUMAR & O. RAKOVEC (2020): On the curious case of the recent decade, mid-spring precipitation deficit in central Europe. – *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1–10. DOI: 10.1038/s41612-020-00153-8.
- IPCC CORE WRITING TEAM, R.K. PACHAURI & L.A. MEYER (2014): Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – *Climate Change* 2014.
- KAHLENBORN, W., L. PORST, M. VOSS, U. FRITSCH, K. RENNER, M. ZEBISCH, M. WOLF, K. SCHÖNTHALER & I. SCHAUER (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung. – Umwelt Bundesamt. Zugriff am 05.2024. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung>.
- KREYE, P., V. WÖRNER, M. GELLESZUN & G. MEON (2017): Detaillierte Nachbildung der Niedrigwasserverhältnisse in der hydrologischen Modellierung für die Ermittlung von Klimafolgen im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet, Niedersachsen. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 370–382. DOI: 10.5675/HyWa_2017.4_1.
- KULKARNI, A. & H. STORCH (1995): Monte Carlo experiments on the effect of serial correlation on the Mann-Kendall test of trend. – *Meteorologische Zeitschrift*, 4(2), 82–85. DOI: 10.1127/metz/4/1992/82.
- LAHA, G. & G. BÖSCHL (2006): Flächendeckende Bestimmung von Niedrigwasserkenngrößen in Österreich. – Zugriff am 09.11.2023. Available at: <http://hdl.handle.net/20.500.12708/25524>.
- LEE, J.-Y., J. MAROTZKE, G. BALA, L. CAO, S. CORTI, J.P. DUNNE, F. ENGELBRECHT et al. (2021): Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. – In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- MANIAK, U. (2016). Einführung Hydrologie und Wasserwirtschaft. *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*, S. 1–19.
- OESTERMANN, F., & C. MUDERSBACH (2021): Langjährige Trends der Niedrigwasserkennwerte in Deutschland. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 65(4), 137–155. DOI: 10.5675/HyWa_2021.4_1.
- PÖRTNER, H.-O., D.C. ROBERTS, M. TIGNOR, E.S. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, A. ALEGRÍA, M. CRAIG et al. (2022): IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge UK: Cambridge University Press.
- R CORE TEAM (2023): R: A Language and Environment for Statistical Computing. – R Foundation for Statistical Computing. Zugriff am 10.08.2024. <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>.
- RIEDEL, T., C. NOLTE, T. AUS DER BEEK & J. LIEDTKE (2021): Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. – www.umweltbundesamt.de, Zugriff am 07.06.2023. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf.
- ROTTLER, E., A. BRONSTER, G. BÜRGER & O. RAKOVEC (2021): Projected changes in Rhine River flood seasonality under global warming. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 2353–2371. DOI: 10.5194/hess-25-2353-2021.
- SAMANIEGO, L., M. KALUZA, R. KUMAR, O. RAKOVEC, L. SCHÜLER, R. SCHWEPPE, P.K. SHRESTHA, S. THOBER & S. ATTINGER (2019): Mesoscale Hydrologic Model. – Zugriff am 05.05.2021. <https://zenodo.org/record/3239055>.
- SEN, P.K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. – *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- TRAUTH, N. & R. HAUPT (2022): Niedrigwasser in Thüringen – Zeitreihenanalyse von Abflüssen an Fließgewässerpegeln. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 66(4), 266–280. DOI: 10.5675/HyWa_2022.4_1.
- UBA (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. – Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung.
- VAN VUUREN, D.P., J. EDMONDS, M. KAINUMA, A. THOMSON, K. HIBBARD, G. HURTT, T. KRAM et al. (2011): The representative concentration pathways: an overview. – *Climatic Change*, 109(1), 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- WALKENHORST, O. & M. STOCK (2009): Regionale Klimaszenarien für Deutschland: eine Leseanleitung. – E-Paper der ARL, Nr. 6. Hannover: Akad. für Raumforschung und Landesplanung.
- WEIDLICH, S. (2020): Unsicherheiten der globalen Emissionsentwicklung. – In: *Anpassung an die Folgen des Klimawandels: Rechtliche Steuerung bei unsicheren Wissensgrundlagen*, 52.
- YUE, S., P. PILON & G. CAVADIAS (2002): Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. – *Journal of Hydrology*, 259(1–4), 254–271. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00594-7.
- ZHANG, X., & F. ZWIERS (2004): Comment on „Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test“ by Sheng Yue and Chun Yuan Wang. – *Water Resources Research*, 40(W03805). DOI: 10.1029/2003WR002073.