

Nico Trauth & Ralf Haupt

Niedrigwasser in Thüringen – Zeitreihenanalyse von Abflüssen an Fließgewässerpegeln

Lowflow situations in Thuringia – Time series analysis of discharges at river gauges

Im Sommer des Jahres 2018 trat in Mitteleuropa eine intensive Hitzewelle auf. Die Folgen waren äußerst niedrige Wasserstände in Fließgewässern, Seen und dem Grundwasser. Aus diesem Anlass ist für das Gebiet Thüringens das Auftreten und die Stärke von Niedrigwasserereignissen detailliert untersucht worden. Hierzu standen Tagesmittelwerte des Abflusses von 122 Pegeln für den Zeitraum 1925 bis März 2019 zur Verfügung. Es zeigt sich, dass in Thüringen in nahezu jedem Jahrzehnt extreme Niedrigwasserjahre auftraten. Das Wasserhaushaltjahr (WHJ) 2018 war hierbei ein sehr lang anhaltendes, sehr gleichmäßiges, sämtliche Regionen betreffendes Niedrigwasserjahr (prozentuale mittlere Abweichung vom mittleren Abfluss MQ: 36,5 %; Dauer der Unterschreitung des langjährig mittleren NM30Q: 169 Tage). Das bisher stärkste Niedrigwasserjahr von 1976 wird allerdings vom WHJ 2018 bezüglich der meisten Niedrigwasserkenngrößen nicht überschritten. Jedoch hatte das WHJ 2018 im Mittel aller betrachteten Pegel für NM30Q das seltenste Wiederkehrintervall (15 Jahre) seit 1959. Einzugsgebiete in niedrigen Höhenlagen mit wenig Waldanteil, geringem mittleren Gefälle und wenig Niederschlag sind stärker von Niedrigwasserereignissen betroffen (z. B. das Thüringer Becken). Mann-Kendall-Tendenztests für mittlere jährliche Abflüsse zwischen 1978 und 2018 ergeben, dass für 74,3 % der Pegel die Abflüsse signifikant sinken. Für die mittleren Abflüsse in den Sommermonaten (April bis September) ist für 85,1 % der Pegel eine signifikante Abnahme der Abflüsse zu verzeichnen.

Schlagwörter: Niedrigwasserabflüsse, Thüringen, Zeitreihenanalyse, Trendanalyse, Dürre, Fließgewässerpegel, Pardé-Koeffizient

In the summer of 2018, an intense heat wave occurred in Central Europe followed by extreme low water level in rivers, lakes and ground-water bodies. In this study, the occurrence and the magnitude of low flow periods are evaluated by means of time series analysis of discharge measurements at river flow gauges of the federal state of Thuringia, Germany. The analysis includes 122 gauges evaluating the daily mean discharge measurements within monitoring periods from 1925 to 2018.

The results show that low flow periods occurred in Thuringia during almost every decade. Specifically, during the year 2018 the low flow period was extremely long lasting and regionally equally distributed over all gauges (percentage mean deviation from MQ: 36.5 %, duration below the threshold value of long-term mean NM30Q: 169 days). However, with respect to low flow statistics the period during the year 1976 was not surpassed in the year 2018. Despite that fact, the low flow period during 2018 showed the most extreme reoccurrence period since 1959 (15.4 years), in consideration of the mean value of all gauges. Catchments at lower altitudes with little forest areas, small mean slopes and low precipitation are more affected by low flow periods. Mann-Kendall trend tests applied to annual mean discharges between 1978 and 2018 reveal that for 74.3 % of the gauges the discharges decrease significantly. For the mean discharge values during the summer months (April to September), a significant discharge decrease was observed for 85.1 % of the gauges.

Keywords: low water level, Thuringia, time series analysis, trend analysis, drought, river gauges, Pardé-coefficient

1 Einleitung

In den Jahren 2018 und 2019 kam es in Mitteleuropa über längere Perioden zu intensiven Hitzewellen mit stark unterdurchschnittlichen Regenfällen (KORNHUBER et al., 2019) – eine Kombination mit zum Teil verheerenden Auswirkungen für Natur und Mensch. Folgen, wie niedrige Wasserstände in Fließgewässern, Seen und Grundwasser, stellen ein ernsthaftes Problem für aquatische Ökosysteme und die Wasserwirtschaft dar. Ökologische und wirtschaftliche Schäden sind die Folgen (KOOP et al., 2007). Während die Abflüsse in den Thüringer Fließgewässern zunächst noch durch gespeicherte Wassermengen aus dem feuchteren Jahr 2017 gestützt wurden, verharrte das Abflussniveau im Sommer/Herbst 2018 verbreitet und auf Dauer im Bereich bisheriger Niedrigstwerte. Danach führten selbst vereinzelte Niederschlagsereignisse oder einzelne niederschlagsreiche Monate nicht zu einer Erhöhung des Abflussniveaus. Dies hatte zur Folge, dass auch das Jahr 2019 aus gewässerkundlicher Sicht von Niedrigwassersituationen geprägt war.

Es wurde offensichtlich, dass der überjährige Zeitraum 2018/2019 hinsichtlich des Wassermangels eine Ausnahmestellung einnimmt und damit einer genaueren Analyse und Einordnung

bedarf. Dies war Anlass, in Thüringen vorhandene Grundlagen zum Niedrigwasser zusammenzufassen (HAUPT, 2004, 2008), Kenntnislücken durch neue Untersuchungen zu schließen (IAWG, 2017; DHI-WASY, 2018) und all dies auf die Einschätzung der Trockenperiode(n) 2018/2019 anzuwenden (BCE, 2020).

Während die komplette Auswertung von BCE (2020) in der Schriftenreihe des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) veröffentlicht worden ist (TRAUTH & HAUPT, 2021), dokumentiert vorliegender Artikel die wichtigsten Aspekte aus der Analyse von Abflussmessreihen an Thüringer Pegeln. Vor dem Hintergrund der Niedrigwasserjahre 2018 und 2019 wird Auskunft über das möglicherweise geänderte und aktuelle Niedrigwasserabflussverhalten der Thüringer Flüsse gegeben. Ein Beitrag für die gewässerkundliche Bewertung zukünftiger Niedrigwasser in Thüringen und die Beantwortung operativer Fragestellungen wird damit bereitgestellt.

2 Datengrundlage

Verwendet wurden die über einen Tag gemittelten Abflusswerte (TMQ) von insgesamt 122 Pegeln aus dem Bundesland Thüringen. Diese liegen in den drei europäischen Hauptstromgebieten



Abbildung 1
Übersichtskarte der verwendeten Pegel und der drei Hauptstromgebiete in Thüringen.
Map with gauges and the three major river catchments in Thuringia.

(HSG) der Elbe, Weser und des Rheins. Die längsten Aufzeichnungen in den jeweiligen HSG begannen im Jahr 1918 am Pegel Meiningen/Werra (Weser), im Jahr 1921 am Pegel Schwarzburg/Schwarza (Elbe) und 1960 am Pegel Steinach/Steinach (Rhein). In Abbildung 1 sind die verwendeten Pegel in den HSG in Thüringen dargestellt. Neben den Abflusswerten wurden die Ergebnisse aus den Analysen von DHI-WASY (2018) und IAWG (2017) verwendet. Diese stellen u. a. die niedrigsten mittleren Abflusswerte über eine bestimmte Anzahl Tage x ($NMxQ$) pro Jahr sowie deren Größe für bestimmte Jährlichkeiten T [$NMxQ(T)$] zur Verfügung.

Zusätzlich zu den Koordinaten der Pegel liegen spezifische Eigenschaften zu geografischen und klimatischen Parametern der jeweiligen Einzugsgebiete (EZG) vor (DHI-WASY, 2018). Diese Parameter wurden in der Analyse auf eventuelle Korrelationen zu den Abflusskennwerten untersucht.

3 Methodik

3.1 Datenaufbereitung

Die verwendeten Pegelzeitreihen haben zuvor die routinemäßigen Aufbereitungsschritte des gewässerkundlichen Lan-

desdienstes durchlaufen (Längsschnittbilanzen, Beseitigung von Messfehlern, ggf. Lückenschluss). Maßgeblich talsperrenbeeinflusste Pegel sind in der Analyse nicht enthalten.

Für die Zeitreihenbewertung kam die Programmiersprache Python Version 3.0 mit der grafischen Benutzeroberfläche Spyder Version 3.0 zum Einsatz (Python-Bibliothek Pandas, zur Erstellung der Abbildungen die Python-Bibliotheken Matplotlib und Seaborn).

Im ersten Schritt wurde für alle Pegel die Vollständigkeit der Wasserhaushaltsjahre (WHJ) (1. April bis 31. März des Folgejahres) bis einschließlich WHJ 2018 (bis 31. März 2019) geprüft. Nur WHJ mit vollständiger Datenbelegung sind berücksichtigt. Sieben Zeitreihen sind wegen Stationsveränderungen gekürzt oder zusammengeführt worden. Insgesamt lagen danach 7.064 Stationsjahre vor, was einer mittleren Pegelaufzeichnungsdauer von ca. 58 Jahren entspricht.

3.2 Deskriptive Statistik

Zahlreiche, für die Niedrigwasseranalyse von Fließgewässern geeignete Kenngrößen nennt die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA, 2020). Für jeden

Pegel bis einschließlich des WHJ 2018 wurden unter anderem nachfolgende Größen ausgewählt und berechnet (weitere Kennwerte in BCE (2020) und TRAUTH & HAUPT (2021)):

- NNQ: niedrigster Wert aus allen TMQ einer gesamten Zeitreihe
- NQ_Jahr: niedrigster Wert aus allen TMQ für ein WHJ
- NQ_Monat: niedrigster Wert aus den TMQ für einen spezifischen Monat über alle Jahre
- MNQ: Mittelwert aus allen NQ_Jahr
- MNQ_Monat: Mittelwert aus NQ_Monat für einen spezifischen Monat über alle Jahre
- MNQ_Winter: Mittelwert aus NQ_Monat für die Zeitspanne 1. Oktober bis 31. März
- MNQ_Sommer: Mittelwert aus NQ_Monat für die Zeitspanne 1. April bis 30. September
- MQ: Mittelwert aus allen TMQ einer gesamten Zeitreihe
- MQ_Jahr: Mittelwert aus allen TMQ für ein WHJ
- MQ_Monat: Mittelwert aus TMQ für einen spezifischen Monat über alle Jahre
- MQ_Winter: Mittelwert aus allen TMQ für die Zeitspanne 1. Oktober bis 31. März
- MQ_Sommer: Mittelwert aus allen TMQ für die Zeitspanne 1. April bis 30. September

Damit lassen sich die mittleren (MNQ), die extremen (NNQ) und die saisonalen (Monate/Halbjahre) Niedrigwasserverhältnisse im Verhältnis zum mittleren Abfluss (MQ) umfassend beschreiben.

3.3 Abweichungen von langjährigen Mittelwerten

Die Abweichungen von langjährigen Mittelwerten können sowohl als absolute Abweichung (in m^3/s oder mm) als auch als prozentuale Abweichung dargestellt werden. Durch diese Normierung auf die langjährigen Mittelwerte lassen sich die Abweichungen für die verschiedenen Pegel sehr gut miteinander vergleichen, obwohl sie unterschiedliche absolute Abflüsse aufweisen. Die absoluten Abweichungen, insbesondere in mm, eignen sich für einen Vergleich für Wasserdefizite mit Bezug auf die gesamte Wasserbilanz.

3.4 NMxQ-Werte

In der Niedrigwasseranalyse liefern NMxQ-Werte sehr gute Aussagen hinsichtlich der Dauer und Intensität einer Niedrigwasserperiode (DWA, 2020). NMxQ bezieht sich auf das niedrigste arithmetischen Mittel von x aufeinanderfolgenden Tagesmittelwerten innerhalb eines Jahres. Das gleitende Mittel umfasst üblicherweise einen Tag (entspricht dann NQ_Jahr, bzw. als langjähriger Mittelwert MNQ), sieben Tage, 14 Tage, 30 Tage oder 31 Tage. Die NMxQ-Werte wurden jahresweise ermittelt und anschließend der Mittelwert berechnet ($\overline{\text{NMxQ}}$). Weiterhin ist die Unterschreitungsdauer $\text{sumD}(\overline{\text{NMxQ}})$ von Bedeutung, welche die Anzahl der Tage definiert, an denen die jeweiligen NMxQ-Werte unterschritten wurden. In dieser Studie wurden die gesamten $\text{sumD}(\overline{\text{NMxQ}})$ -Werte innerhalb eines WHJ unabhängig von eventuellen Unterbrechungen betrachtet.

3.5 Trendanalysen

Für MQ_Jahr, MQ_Monat, NQ_Monat, NQ_Jahr erfolgten die Trendanalysen mit dem Mann-Kendall-Test, da die Verteilung und die ggf. vorliegende Nicht-Linearität der Daten hier keine Rolle spielt. Bei diesem Trendtest wird der Rangkorrelations-

koeffizient "Kendall'sches τ " sowie der p-Wert berechnet, welcher Auskunft über die Signifikanz des Trends gibt (YUE et al., 2002). Je nach Vorzeichen von τ existiert ein negativer oder ein positiver Trend. Bei einem p-Wert $< 0,05$ ist von einem signifikanten Trend auszugehen. Um mögliche Effekte auf den Trend durch Autokorrelation in den Daten auszuschließen, wurde der laut DWA (2020) empfohlene, von HAMED & RAO (1998) modifizierte Mann-Kendall-Trendtest verwendet. Da die Pegelzeitreihen unterschiedliche Laufzeiten aufweisen, wurden für eine zusammenfassende Aussage gleich lange Zeitabschnitte herangezogen.

Des Weiteren wurde die Veränderung des Pardé-Koeffizienten untersucht, was Hinweise auf Trends bezüglich einer (sich ändernden) Abflussaufteilung innerhalb des Jahres auf die einzelnen Monate geben kann. Der Pardé-Koeffizient berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen dem mittleren Abfluss eines bestimmten Monats und dem Mittelwert des gesamten WHJ bzw. eines längeren Zeitabschnitts (PARDÉ, 1933). Ein Pardé-Koeffizient > 1 weist auf einen überdurchschnittlich hohen Durchfluss hin (z. B. in den Wintermonaten), während ein Wert < 1 einen Durchfluss niedriger als das Mittel kennzeichnet (z. B. in den Sommermonaten). Die Pardé-Koeffizienten wurden für alle Pegel über 10-jährige, sich nicht überlappende Zeitabschnitte für jeden Kalendermonat berechnet. Somit erhält man für jeden Kalendermonat einen Wert pro Pegel für jeden Zeitabschnitt. Hieraus lassen sich Änderungen im saisonalen Abflussgeschehen über die Jahrzehnte beschreiben.

3.6 Zuweisung von Jährlichkeiten

Mit den Niedrigwasser-Jährlichkeiten $\text{NMxQ}(T)$ für die Wiederkehrintervalle T mit 2 Jahren, 5 Jahren, 10 Jahren, 20 Jahren, 50 Jahren und 100 Jahren aus IAWG (2017) konnte jahresweise für alle Pegel ein Wiederkehrintervall zu den jährlichen Abflusswerten $\text{NM7Q}(a)$ und $\text{NM30Q}(a)$ abgeschätzt werden. Die entsprechende Jährlichkeit ergab sich durch Interpolation der $\text{NMxQ}(T)$ -Werte aus IAWG (2017). Die alternativ denkbare Zuordnung der Messwerte direkt in die bei IAWG (2017) pegelweise gewählten extremwertstatistischen Verfahren oder eine Aktualisierung der Extremwertstatistik wurde für die hier angestrebte Ableitung genereller Aussagen und Relationen nicht vorgenommen. Aus den einzelnen Jährlichkeiten aller Pegel wurden jahresweise Mittelwert und Median bestimmt. Die so ermittelten Werte werden als ganzzahlige Jährlichkeiten angegeben, womit eine Einordnung der untersuchten Niedrigwasserkennwerte für jedes WHJ möglich ist.

4 Ergebnisse

4.1 Niedrigwasserereignisse in Thüringen

In der Vergangenheit traten zahlreiche Niedrigwasserereignisse (NQE) in Thüringen auf. Diese NQE unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Dauer und Intensität. Um diese Variabilität in den NQE zu berücksichtigen, wurden drei statistische Parameter für eine Rangfolgeanalyse der WHJ herangezogen:

- Abweichung in Prozent vom langjährigen Mittelwert, gemittelt über alle Pegel innerhalb eines WHJ.
- Anzahl der Pegel, die das langjährige Mittel von MQ und MNQ innerhalb eines WHJ unterschreiten.
- Summe an Tagen einer Unterschreitung von $\overline{\text{NMxQ}}$ ($\text{sumD}(\overline{\text{NMxQ}})$), gemittelt über alle Pegel innerhalb eines WHJ.

Für die sehr frühen Aufzeichnungen aus den Jahren 1911 bis 1924 liegen Daten für weniger als zwölf Pegel vor (< 0 % der Gesamtanzahl von Pegeln), wodurch die statistische Aussagekraft klein ist. In der Rangfolgeanalyse werden daher erst die WHJ ab dem Jahre 1925 berücksichtigt.

In Abbildung 2a sind die prozentualen Abweichungen von MQ über alle Pegel als Boxplot für jedes WHJ aufgetragen und nach ihrem Mittelwert aufsteigend sortiert. Nach dieser Betrachtung sind die jüngeren NQE (innerhalb der letzten 30 Jahre) erst relativ nachgeordnet zu finden, an der Spitze liegen hier NQE aus den

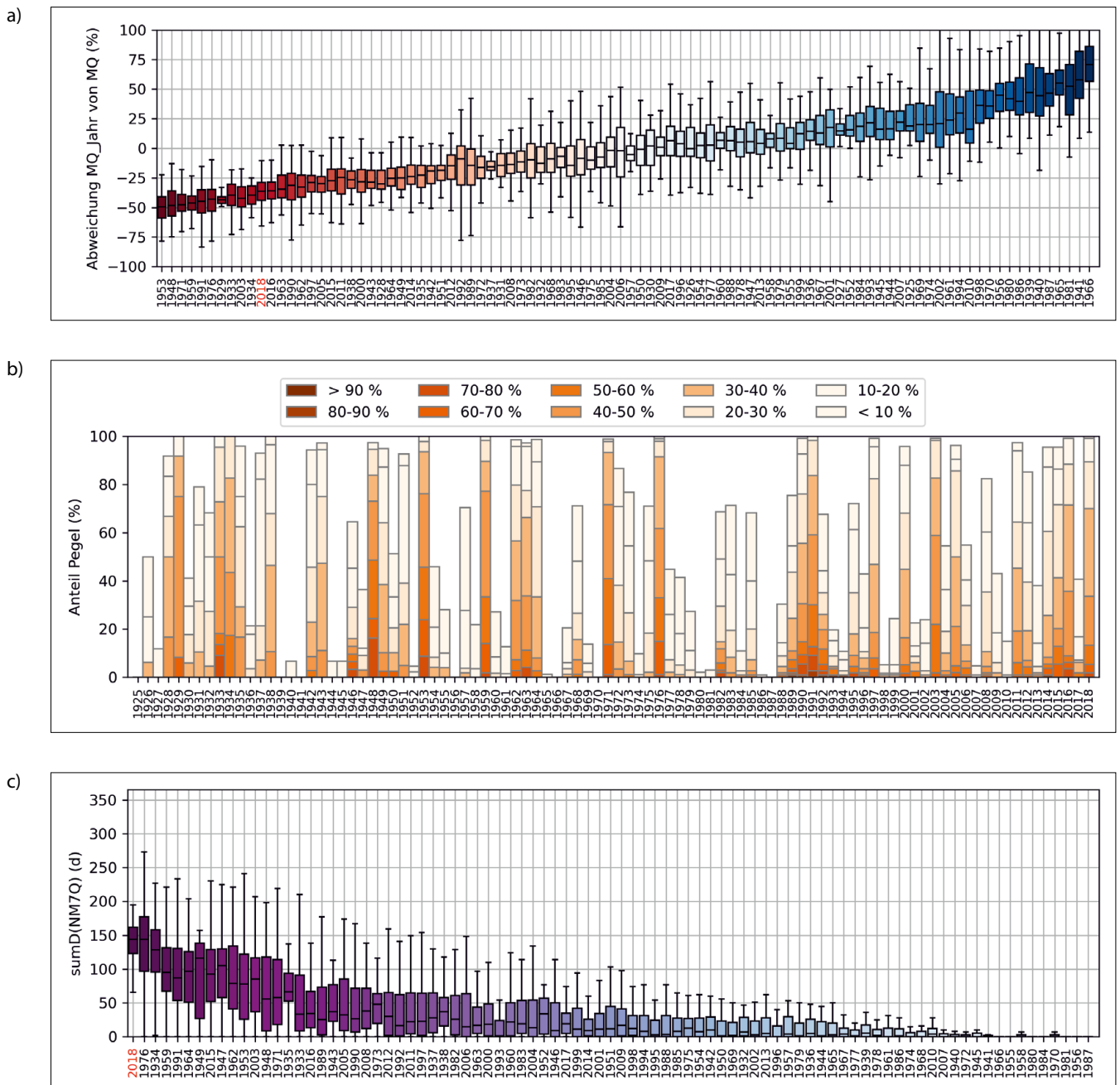


Abbildung 2

- a) Prozentuale Abweichung vom langjährigen Mittelwert MQ durch MQ_Jahr innerhalb eines WHJ für alle Pegel, aufsteigend sortiert nach dem Mittelwert (Box-Whiskers-Plots mit Median, oberem und unterem Quartil und Balken (Whiskers) mit maximaler Länge des 1,5-fachen Interquartilsabstandes bzw. dem letzten Datenwert innerhalb dieser Grenze),
 b) Anteil der Pegel, an denen der langjährige mittlere Abfluss MQ durch den mittleren Jahresabfluss MQ_Jahr unterschritten wird (farbliche Differenzierung zeigt die Stärke der Abweichung in % an),
 c) Summe der Unterschreitungstage von NM7Q innerhalb eines WHJ für alle Pegel, absteigend sortiert nach dem Mittelwert.
 a) Percentage deviations of the annual mean discharges (MQ_Jahr) from long-time mean discharge (MQ) for all gauges, sorted by the mean values, (Box-Whiskers-Plots with median, upper and lower quartiles and whiskers as maximum 1,5-times of the interquartile range, or last data value within this range),
 b) Fraction of gauges, where the annual mean discharge MQ_Jahr is lower than the long-time mean discharge (colours indicate the percentage deviation),
 c) Sum of days when daily discharge was lower than threshold NM7Q, sorted by the mean of all gauges.

1940er bis 1970er Jahren. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass die Datenlage zu diesen Zeitpunkten noch vergleichsweise gering war. Das WHJ 2018 ist hierbei auf Rang 11 (MQ) und 8 (MNQ, nicht dargestellt). Die Karte in Abbildung 3 zeigt die räumliche Verteilung der prozentualen Abweichungen von MQ für das WHJ 2018 in Thüringen.

Die Anzahl der Pegel, die für das jeweilige WHJ eine Unterschreitung von MQ aufweisen, werden als Anteil zur existierenden gesamten Pegelanzahl in Abbildung 2b dargestellt. 100 % bedeutet hierbei, dass alle existierenden Pegel zu diesem Zeitpunkt MQ unterschreiten. Es gab insgesamt neun WHJ, während denen 100 % der Pegel eine Unterschreitung von MQ aufwiesen. Unter diesen WHJ ist auch das Jahr 2018. Bei der Unterschreitung von MNQ (nicht dargestellt) liegt das WHJ 2018 auf dem zweiten Rang (Auswertungen zu MNQ in TRAUTH & HAUPT (2021)).

Die Dauer von Niedrigwasserperioden $\text{sumD}(\overline{\text{NMxQ}})$ zeigt Abbildung 2c (für alle Pegel als Boxplots und nach dem Mittelwert absteigend sortiert). Hierbei liegt das WHJ 2018 auf dem

ersten Rang für $\overline{\text{NM7Q}}$ und dem zweiten Rang für die Unterschreitung von NM30Q (nicht dargestellt).

In Abbildung 3 sind die Abweichungen von MQ für das WHJ 2018 in Thüringen dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Pegel innerhalb des Thüringer Beckens stärker von MQ abweichen als Pegel in den Höhenlagen (Thüringer Wald). Die EZG der höher gelegenen Pegel haben generell einen hohen Waldanteil, steiles mittleres Gefälle, einen hohen mittleren Niederschlag und eine niedrige mittlere Temperatur (und somit eine niedrige Evapotranspiration). Demgegenüber weisen EZG im Unterlauf der Gewässer entgegengesetzte Wertebereiche auf.

Für sechs Niedrigwasserkennwerte wurden die jeweiligen Ränge der WHJ bestimmt. Hieraus kann wiederum ein Mittelwert gebildet werden, um nur noch einen Rangwert pro WHJ zu erhalten. Tabelle 1 zeigt die nach dieser Methodik ersten zehn Jahre. Insgesamt wird ersichtlich, dass die extremsten Niedrigwasserperioden ihren Schwerpunkt bei den WHJ 1959 (57 Pegel), 1976 (94 Pegel), 1991 (110 Pegel), 2003 (109 Pegel) und 2018

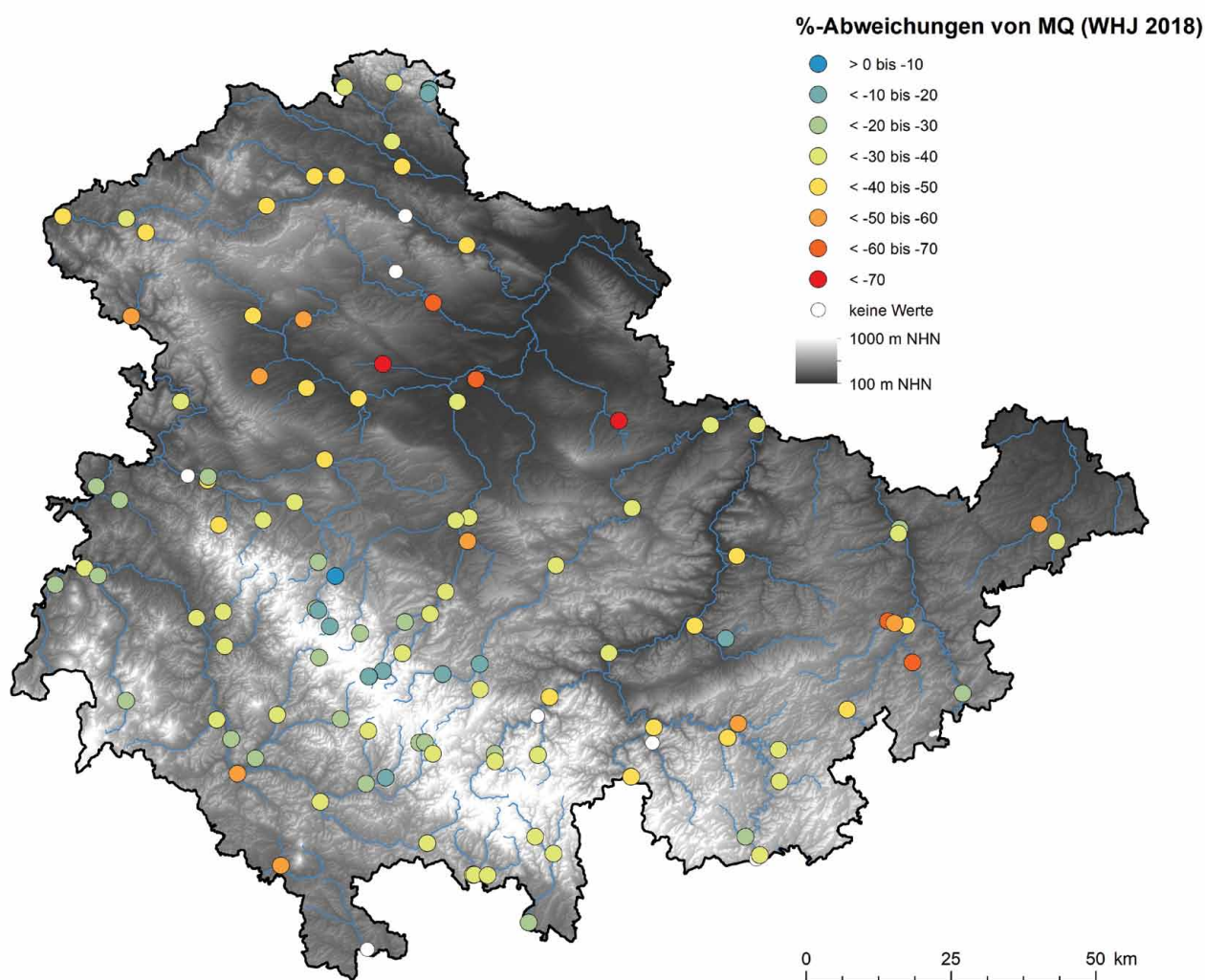


Abbildung 3

Karte mit prozentualen Abweichungen des Jahresmittelwerts MQ_{Jahr} für das WHJ 2018 vom langjährigen Mittel MQ und Höhenmodell im Hintergrund.

Map showing the percentage deviations of the annual mean discharges of 2018 from long-time mean discharge (MQ), and elevation in background.

Tabelle 1
Rangfolgeanalyse für die Auswertung von Niedrigwasserereignissen in Thüringen.
Rank analysis for evaluating the low flow periods in Thuringia.

Lfd. Nr.	Jahr	Pegel Anzahl	Ø Rang	Abweichungen vom langjährigen Mittel				Anzahl Pegel Unterschreitung langjähriges Mittel				Summe Unterschreitungstage NMxQ pro Jahr			
				MQ		MNQ		MQ		MNQ		sumD (NM30Q)		sumD (NM7Q)	
				% Ø	Rg.	% Ø	Rg.	%	Rg.	%	Rg.	Ø	Rg.	Ø	Rg.
1	1976	94	2,9	-45,0	6	-53,6	5	100,0	1	95,7	4	170	1	135	2
2	1934	23	3,7	-39,8	10	-63,1	2	100,0	1	95,7	5	156	3	133	3
3	2018	113	4,1	-36,5	11	-51,1	8	100,0	1	97,3	2	169	2	142	1
4	1959	57	4,1	-46,2	4	-52,4	6	100,0	1	94,7	6	138	5	106	5
5	1991	110	5,5	-45,0	5	-47,0	9	100,0	1	94,5	7	137	7	105	7
6	1929	12	6,3	-42,1	7	-70,9	1	100,0	1	100,0	1	113	16	91	12
7	1953	46	8,0	-49,4	1	-37,2	14	100,0	1	84,8	17	130	10	87	13
8	2003	109	12,1	-41,0	9	-37,9	13	99,1	12	88,1	12	125	13	87	13
9	1962	69	12,5	-31,6	15	-34,7	15	98,6	16	88,4	13	143	4	93	11
10	1971	88	13,2	-46,2	3	-32,4	16	98,9	14	87,5	8	119	15	77	17

(113 Pegel) haben. Das Jahr 1947 (33 Pegel) nimmt eine gewisse Sonderstellung ein (in Tab. 1 nicht dargestellt, belegt Rang 24), da die Abweichung von MQ positiv ist, was auf die hohen Abflüsse in den Wintermonaten des WHJ 1947 zurückzuführen ist.

Alle anderen Parameter zur Charakterisierung von NQE weisen aber auf ein sehr starkes NQE im Sommer 1947 hin. Weil im Jahr 1929 und 1934 nur Daten zu wenigen Pegeln existieren, wurden diese Jahre wegen mangelnder statistischer Aussagekraft

nicht in die weiterführende Analyse miteinbezogen. Auch das Jahr 1953 wurde nicht in die nachfolgende Analyse miteinbezogen, da bis auf die Abweichung von MQ keine weiteren Parameter zur Bewertung von Niedrigwasser auffällig sind.

Festzuhalten ist, dass nahezu in jedem Jahrzehnt seit Beginn der Pegelaufzeichnungen eine mehrjährige Niedrigwasserperiode aufgetreten ist, innerhalb derer ein extremes Niedrigwasserjahr (s. o.) liegt (vgl. auch Abb. 2b).

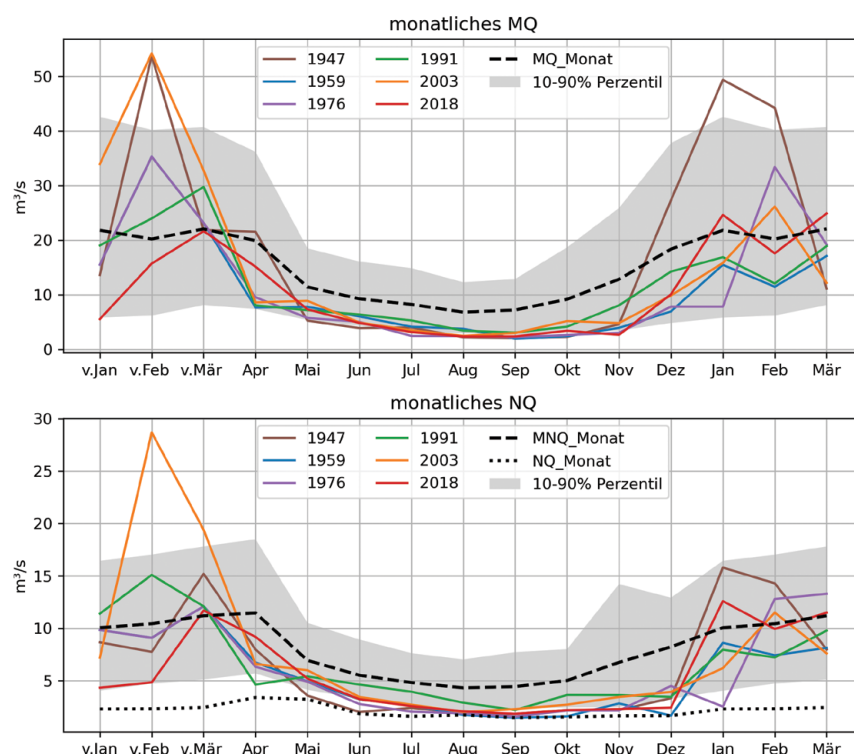


Abbildung 4

Saisonale Variation der monatlich gemittelten Abflüsse (oben) und der niedrigsten Monatsabflüsse (unten) für ausgewählte Niedrigwasserjahre am Pegel Meiningen/Werra im Vergleich zum Jahresgang der langjährigen mittleren Monatswerte MQ-Monat und MNQ-Monat sowie das NQ_Monat. Die Monate des vorherigen WHJ sind mit "v." gekennzeichnet.

Seasonal variation of mean monthly discharges (upper) and of lowest monthly discharges (lower) compared to long term mean discharges for selected low flow periods at gauge Meiningen/Werra. The month of the previous water balance year are marked by "v."

4.2 Zeitlicher Verlauf der Niedrigwasserereignisse

In Abbildung 4 sind exemplarisch für den Pegel Meiningen/Werra (längste Datenreihe in dieser Untersuchung) diejenigen NQE dargestellt, welche im vorhergehenden Kapitel 4.1 für Thüringen als besonders überregional und anhaltend identifiziert worden waren. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Abläufe bei den meisten anderen Pegeln in Thüringen prinzipiell ähnlich ausgeprägt waren.

Die NQE finden vor allem im Zeitraum Juli bis Oktober statt. Ab März/April sinkt der Abfluss bereits auf ein sehr niedriges Niveau, wobei das WHJ 2018 erst ab April/Mai deutlich absinkt, dies allerdings lange anhält. Erst im Januar des Folgejahres gibt es beim monatlichen NQ eine nennenswerte Zunahme, was bei allen anderen NQE

in vorherigen Monaten wenigstens zwischenzeitlich einmal der Fall gewesen war. Das Jahr 1947 weicht von den anderen Niedrigwasserjahren mit überdurchschnittlichen Abflüssen im Januar/Februar sowie Dezember und zumindest durchschnittlichen Abflüssen im April ab. In den anderen Monaten war der Abflussmangel 1947 dagegen zum Teil äußerst massiv.

Im Grundsatz zeigen die dargestellten Niedrigwasserjahre mindestens anhaltende Unterschreitungen der langjährigen Vergleichswerte (MQ_Monat und MNQ_Monat). Das 10%-Quantil aller Monats-NQ der Gesamtreihe wird ebenfalls zeitweise unterschritten.

4.3 Trendanalysen

4.3.1 Mann-Kendall-Trendtests

Die Pegelzeitreihen weisen unterschiedliche Laufzeiten auf. Für eine zusammenfassende Aussage bzgl. der Trends werden gleich lange Abschnitte herangezogen. Je kürzer der Zeitabschnitt gewählt wird, desto mehr Pegelzeitreihen stehen zur Verfügung, da im Laufe der Zeit mehr Pegel installiert wurden. Jedoch ist die Aussagekraft zu Trends umso größer, je länger der betrachtete Zeitabschnitt ist. Es wurden daher für jeden Zeitabschnitt beginnend vom WHJ 1912 bis zum WHJ 2018 die jeweiligen Trends ausgewertet. Die Zeitabschnitte zwischen WHJ 2009 und 2018 wurden aufgrund der Kürze des Abschnittes von weniger als zehn Jahren nicht ausgewertet. Es wird deutlich, wie die Wahl des Zeitabschnittes der Pegelaufzeichnung die Trend-Bewertung beeinflusst.

Der Anteil der Pegel, der einen signifikanten negativen Trend für NQ_Jahr beschreibt, variiert über die Zeit mit einem Maximum um das Jahr 1980 (Abb. 5). Hier zeigen z. B. die Daten für den Zeitabschnitt von ≈ 1980 bis 2018, dass fast 50 % der Pegel einen signifikant negativen Trend aufweisen. Der Anteil der Pegel mit signifikantem Trend verringert sich mit kürzer werdenden Abschnitten. Bemerkenswert ist auch, dass der Anteil der Pegel, die einen positiven Trend aufweisen, mit kürzerem Abschnitt geringer wird. Insgesamt ist zu erkennen, dass seit den fünfziger Jahren der Anteil an Pegeln mit signifikant negativem Trend stets den Anteil an Pegeln mit positiven Trends überwiegt. Diese

Aussage ist unabhängig davon, welcher Abschnitt für die Trendberechnung gewählt wird und deutet auf eine Verringerung der Niedrigwasserabflüsse NQ_Jahr in den letzten Jahrzehnten hin. Des Weiteren wird ersichtlich, dass der Trend umso stärker wird, je kürzer die Zeitabschnitte gewählt werden (Farbgebung in Abb. 5). Dieser Zusammenhang deutet darauf hin, dass insbesondere in den letzten 20 Jahren die Abnahme der NQ_Jahr-Abflüsse stärker geworden ist.

Für eine abschließende Aussage in Bezug auf vorliegende Trends in den ausgewerteten Pegelzeitreihen wurden daher sowohl ein Zeitabschnitt von 70 Jahren als auch von 40 Jahren gewählt (Tab. 2). Der lange Zeitabschnitt umfasst den Zeitraum ab WHJ 1948 bis 2018 und berücksichtigt rd. ein Drittel der Gesamtanzahl der Pegel. Der kürzere Zeitabschnitt von 40 Jahren seit dem WHJ 1978 bezieht 82 % der Pegel in die Analyse mit ein.

Generell zeigt sich für alle hydrologischen Größen, dass für den 40-jährigen Zeitabschnitt die Anteile der Pegel mit einem signifikanten Trend größer sind, insbesondere auch die Anteile mit einem signifikant negativem Trend. Für die Abflussentwicklung in den letzten 40 Jahren ist demnach ein negativer Trend der Niedrigwasserabflüsse stärker verbreitet. Ausnahmen bilden hier die Ergebnisse für NQ_Januar, NQ_Februar sowie NQ_August, wo die Pegelanteile mit signifikant negativen Trends für den 70-jährigen Zeitabschnitt geringfügig höher sind.

Die stärkste Diskrepanz zwischen 70- und 40-jährigem Zeitabschnitt tritt für die Trends zu den jahresweisen MQ- und NQ-Werten auf. Für den 40-jährigen Zeitabschnitt liegen die Pegelanteile mit signifikant negativen Trends bei 74,3 % (MQ_Jahr) und 48,5 % (NQ_Jahr). Bei Betrachtung des 70-jährigen Zeitabschnitts sind die Anteile mit negativem Trend mit 4,9 % (MQ_Jahr) und 12,2 % (NQ_Jahr) um ein Vielfaches geringer. Für den 70- und 40-jährigen Zeitabschnitt gilt, dass für mehr als 25 %, bzw. 50 % der jeweiligen Pegel die Abflüsse in den Sommermonaten (MQ_Sommer, NQ_Sommer, NQ_April bis NQ_Juli) signifikant negative Trends aufweisen (fett markiert in Tab. 2).

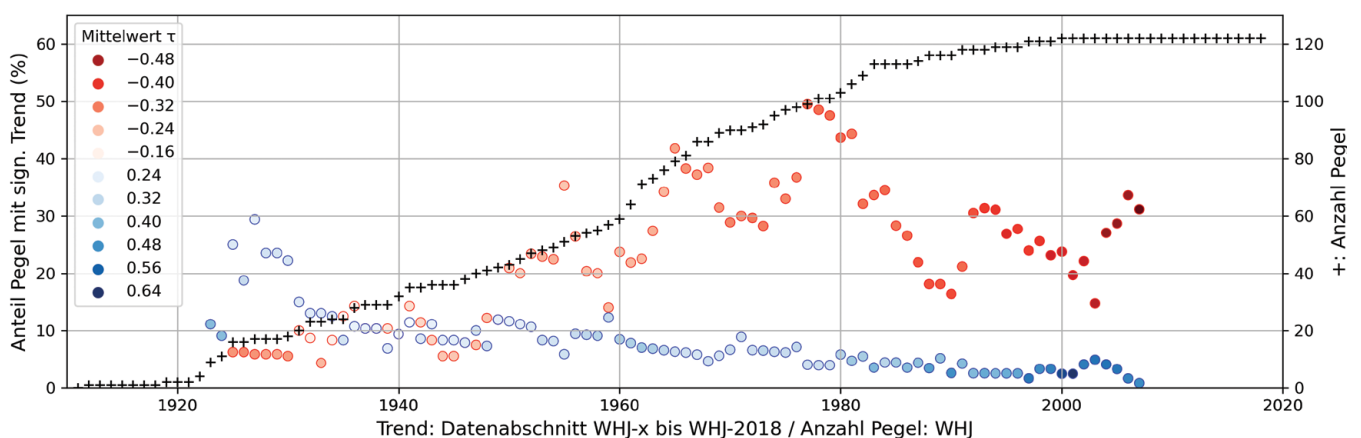


Abbildung 5

Anteil der Pegel mit signifikantem Trend nach Mann-Kendall (modifiziert nach HAMED & RAO, 1998) für NQ_Jahr über Zeitabschnitte zwischen dem jeweiligen Jahr und dem WHJ 2018. Die Anzahl der ausgewerteten Pegel zu einem jeweiligen WHJ ist mit "+" gekennzeichnet (rechte y-Achse).
Fraction of gauges with a significant trend from Mann-Kendall-tendency tests (modified by HAMED & RAO, 1998) for lowest yearly discharges (NQ_Jahr) between the respective year and 2018. The number of gauges used for the analysis is marked by "+" on the right y-axis.

Tabelle 2

Ergebnisse des Mann-Kendal-Trendtests für hydrologische Kenngrößen für gleich lange Pegelzeitreihen beginnend ab WHJ 1948 und WHJ 1978 bis WHJ 2018.

Results for the Mann-Kendal-tests for hydrologic parameters for time series of equal length starting at 1948 and 1978 until 2018.

Parameter	Anzahl Pegel: 1948 / 1978				Anteil Signifikant	Anteil sign. negativer Trend
	Gesamt	Sign. Trend (p < 0,05)	Sign. negativer Trend	Sign. positiver Trend	%	%
MQ_Jahr	41 / 101	3 / 75	2 / 75	1 / 0	7,3 / 74,3	4,9 / 74,3
NQ_Jahr	41 / 101	8 / 53	5 / 49	3 / 4	19,5 / 52,5	12,2 / 48,5
MQ_Winter	41 / 101	6 / 19	1 / 19	5 / 0	14,6 / 18,8	2,4 / 18,8
MQ_Sommer	41 / 101	19 / 86	18 / 86	1 / 0	46,3 / 85,1	43,9 / 85,1
NQ_Winter	41 / 101	7 / 20	3 / 16	4 / 4	17,1 / 19,8	7,3 / 15,8
NQ_Sommer	41 / 101	17 / 57	14 / 54	3 / 3	41,5 / 56,4	34,1 / 53,5
NQ_April	41 / 101	18 / 76	16 / 76	2 / 0	43,9 / 75,2	39,0 / 75,2
NQ_Mai	41 / 101	12 / 80	12 / 79	0 / 1	29,3 / 79,2	29,3 / 78,2
NQ_Juni	41 / 101	17 / 72	16 / 71	1 / 1	41,5 / 71,3	30,9 / 70,3
NQ_Juli	41 / 101	19 / 65	18 / 65	1 / 0	46,3 / 64,4	43,9 / 64,4
NQ_August	41 / 101	16 / 32	14 / 31	2 / 1	39 / 31,7	34,1 / 30,7
NQ_September	41 / 101	13 / 41	10 / 40	3 / 1	31,7 / 40,6	24,4 / 39,6
NQ_Dezember	41 / 101	10 / 26	8 / 25	2 / 1	24,4 / 25,7	19,5 / 24,8
NQ_Januar	41 / 101	6 / 9	2 / 4	4 / 5	14,6 / 8,9	4,9 / 4,0
NQ_Februar	41 / 101	5 / 5	3 / 3	2 / 2	12,2 / 5	7,3 / 3,0
NQ_März	41 / 101	7 / 14	1 / 12	6 / 2	17,1 / 13,9	2,4 / 11,9

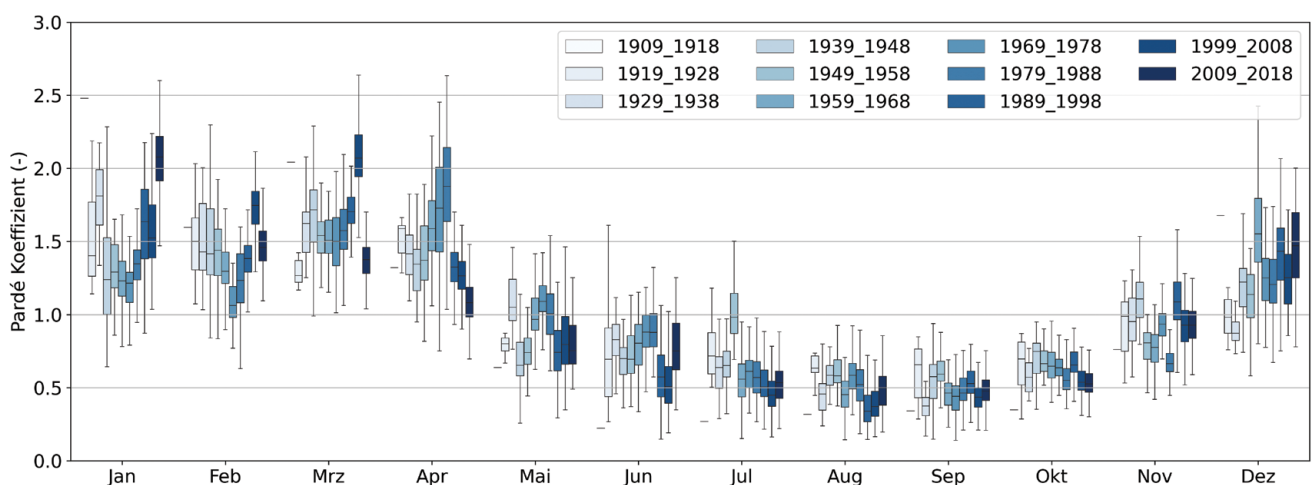
Für die Wintermonate (MQ_Winter, NQ_Winter) überwiegen die Pegelanteile mit signifikant positivem Trend für den 70-jährigen Zeitabschnitt, während für den 40-jährigen Zeitabschnitt die Pegelanteile mit signifikant negativem Trend überwiegen.

Es wird deutlich, dass bei Betrachtung längerer Zeitabschnitte die Niedrigwasser-Entwicklung der letzten Jahrzehnte weniger stark ins Gewicht fällt. Dennoch sind für die Monate im Sommer

auch bei Betrachtung der langen Zeitreihen hohe Pegelanteile deutlich negativen Trends zu verzeichnen.

4.3.2 Änderungen des Pardé-Koeffizienten

In Abbildung 6 ist der saisonale Verlauf des Pardé-Koeffizienten für 10-jährige Abschnitte dargestellt. Auffallend sind hier v. a. die Monate Januar/Februar und April/Mai, in denen seit ca. 30 bis 40 Jahren eine Umkehr der Änderung des Pardé-Koeffizienten erkennbar ist. In den frühen Aufzeichnungen bis zum Jahr 1970

**Abbildung 6**

Monatliche Pardé-Koeffizienten für 10-jährige Zeitabschnitte über alle Pegel (Box-Whiskers-Plots mit Median, oberem und unterem Quartil und Balken (Whiskers) mit maximaler Länge des 1,5-fachen Interquartilsabstandes bzw. dem letzten Datenwert innerhalb dieser Grenze).

Monthly Pardé-coefficients for decadal time periods (Box-Whiskers-Plots with median, upper and lower quartiles and whiskers as maximum 1,5-times of the interquartile range, or last data value within this range).

Tabelle 3

Mittlere Jährlichkeiten T (Angabe in Jahren) für NM7Q(a) und NM30Q(a) in ausgewählten Niedrigwasserjahren.
Mean return periods T for selected low flow periods for NM7Q(a) and NM30Q(a).

WHJ		1947	1959	1976	1991	2003	2018
Jährlichkeit T (NM30Q)	Mittelwert	16	16	12	12	12	15
	Median	10	8	8	7	7	10
Jährlichkeit T (NM7Q)	Mittelwert	9	10	9	6	8	10
	Median	8	6	6	5	5	7

ist ein abfallender Trend in den Monaten Januar/Februar erkennbar, während in diesem Zeitraum im April/Mai der Pardé-Koeffizient steigt. Insgesamt wird es also in diesem Zeitraum im Januar/Februar trockener, während es im April/Mai feuchter wird. Diese Trends kehren sich gegen Ende der 1980er Jahre um, sodass es im Januar/Februar feuchter wird und im April/Mai ein starker Trend hin zu trockeneren Verhältnissen auftritt. Dies kann auf seit dieser Zeit zurückgehende oder gänzlich fehlende Schneedecken zurückzuführen sein, was zum einen zu höheren, direkt abflusswirksamen Niederschlägen im Januar/Februar führt und zum anderen darauf, dass eine ausgeprägte Schneeschmelze im März/April ausbleibt.

Wasserwirtschaftlich gesehen bedeutet dies eine potenzielle Verlängerung von Trockenwetterphasen mit gleichzeitiger Verkürzung der wasserhaushälterischen Regenerationszeit. Der Wassermangel speziell im April/Mai ist besonders problematisch, weil er dann mit dem Start der allgemeinen Vegetationsperiode zusammenfällt. Ausreichend Wasser in dieser Zeit ist für das Wachstum besonders wichtig. Defizite dabei können lange negativ nachwirken, selbst bei möglicherweise guter Wasserversorgung in den Sommermonaten.

4.4 Jährlichkeiten/Wiederkehrintervalle der Niedrigwasserereignisse

Exemplarisch zeigt Tabelle 3 Ergebnisse der Auswertungen für die besonders extremen Niedrigwasserjahre zu den Wiederkehrintervallen für die Kennwerte NM7Q(a) und NM30Q(a) (zur Vorgehensweise vergleiche Kap. 3.6). Für NM30Q(a) liegt die mittlere Jährlichkeit im WHJ 2018 über alle Pegel bei 15 Jahren (Median: 10 Jahre) und ist mit den Niedrigwasserjahren 1947 und 1959 vergleichbar. Die mittlere Jährlichkeit für NM7Q(a) liegt 2018 bei 10 Jahren und weist damit im Vergleich zu älteren Niedrigwasserjahren zusammen mit dem WHJ 1959 die größte Jährlichkeit auf. Der Median der Jährlichkeiten mit 7 Jahren liegt dabei zwischen jenen der Jahre 1947 und 1959. Insgesamt gesehen ist damit das WHJ 2018 hinsichtlich der Wiederkehrintervalle das stärkste Niedrigwasserjahr seit den 1950er/1960er Jahren. Dies trifft für das gesamte Land Thüringen zu, da sich die Jährlichkeiten innerhalb der drei HSG in ihrem generellen Verlauf über die Jahre nicht unterscheiden.

5 Diskussion

Das Auftreten starker Niedrigwasserereignisse (NQE) in jüngerer Zeit in Mitteleuropa hängt u. a. mit der klimatischen Entwicklung in der Arktis zusammen. Die schnellere Erwärmung dort reduziert den Temperaturunterschied in Richtung Süden, sodass die Verlagerung der Hoch- und Tiefdruckgebiete nach Osten verlang-

samt wird. Teilweise kommt es sogar zur Verharrung und damit Blockierung der üblichen Westströmung über Wochen. Dies hat in den Jahren 2018 und 2019 zu einem enormen Niederschlagsdefizit während der langen Andauer von Hochdruckgebieten bei hohen Temperaturen geführt (NASA, 2020). Diese Zusammenhänge führten zuvor schon in den Jahren 2003, 2006, 2010 und 2015 zu den extremsten, jemals aufgezeichneten europäischen Hitzewellen (MANN et al., 2018; KORNHUBER et al., 2019; PSU, 2018; PIK, 2018 und 2019). Die Studien zeigen, dass die Häufigkeit und Dauer der Stagnation in den letzten zwei Jahrzehnten deutlich zugenommen hat. Während es vor 1999 keine Sommer gab, in denen die Wellen des Jetstreams die Stagnation länger als zwei Wochen an einer Stelle verharrten, gab es seitdem bereits sieben solcher Sommer.

Das beschriebene meteorologische Bild findet sich in Thüringen wieder und schlug sich in den vergangenen Jahrzehnten in signifikant fallenden Trends bei Abflüssen im Sommerhalbjahr nieder, allerdings in regional unterschiedlicher Ausprägung. So haben z. B. EZG im Thüringer Wald eine hohe geodätische Höhe, einen hohen Waldanteil, steiles mittleres Gefälle, einen hohen mittleren Niederschlag und eine niedrige mittlere Temperatur (und somit eine niedrige Evapotranspiration). Diese meist im Oberlauf befindlichen EZG und deren Gewässer sind von Niedrigwasserperioden bisher eher schwach betroffen. Demgegenüber gibt es EZG, die im Unterlauf der Gewässer liegen und genau entgegengesetzte Wertebereiche haben. Diese Gewässer weisen insgesamt eine sehr starke mittlere langjährige prozentuale Abweichung während der NQE auf. Meist herrscht hier eine geringere positive Wasserbilanz, sodass diese Gebiete besonders sensitiv auf Systemänderungen reagieren. Zwischen diesen beiden unterschiedlich reagierenden EZG-Typen befinden sich EZG mit gemäßigten klimatischen Bedingungen sowie EZG-Charakteristiken und somit auch moderaten Abflussabweichungen vom MQ.

Das Phänomen fehlender feuchter Jahre seit den 1980er Jahren hat bereits HAUPT (2008) bei einer Trendanalyse von NMxQ(a) bei einzelnen Thüringer Pegeln festgestellt. Die Signale insgesamt waren aber noch zu uneinheitlich, sodass dieses Trendindiz seinerzeit nicht weiterverfolgt wurde. Aus heutiger Sicht ist dagegen festzustellen, dass die vor der 1980er Dekade regelmäßig beobachteten Jahre ohne Niedrigwasserphasen zuletzt immer weniger auftraten. Zudem lässt sich in Folge von gestiegenen Temperaturen eine Verschiebung zu stärker pluvialen Winter-niederschlägen und daher geringerer Feuchte im Frühjahr erklären. Insbesondere der jetzt belegte, stärkere Trend im April/Mai hin zu geringeren Wassermengen (Pardé-Koeffizient) kann dazu führen, dass Hitzewellen, wie in den Jahren 1991, 2003

und 2018 zu extremen NQE führen, da die natürlichen Wasserspeicher bis April nicht ausreichend für das Sommerhalbjahr gefüllt wurden.

6 Zusammenfassung

Die Zeitreihenanalyse von 122 Pegeln an Thüringer Gewässern ergab, dass in nahezu jedem Jahrzehnt extreme Niedrigwasserjahre auftraten. Nennenswert sind hier die Wasserhaushaltsjahre (WHJ) 1947, 1959, 1976, 1991, 2003 und 2018. Insgesamt gesehen lässt sich das WHJ 2018 als ein sehr lang anhaltendes, sehr gleichmäßiges und sämtliche Pegel (bzw. Regionen) betreffendes Niedrigwasserjahr beschreiben. Das bisher stärkste Niedrigwasserjahr von 1976 wird allerdings vom WHJ 2018 bezüglich der Niedrigwasserkenngößen nicht überschritten. Das WHJ 2018 hatte im Mittel aller Pegel für NM30Q das seltenste Wiederkehrintervall (15 Jahre) seit 1959 und für NM7Q ein identisch seltenes Wiederkehrintervall (10 Jahre) wie 1959.

Eine räumliche Analyse der Stärke der Niedrigwasserereignisse ergibt, dass EZG in niedrigeren Lagen (z. B. Thüringer Becken) mit weniger Waldanteil, geringem mittleren Gefälle und weniger Niederschlag stärker von Niedrigwasserereignissen betroffen sind. Umgekehrt reagieren höher gelegene EZG, wie z. B. der Thüringer Wald, weniger stark auf Trockenheit.

Zur Trendbewertung wurden Mann-Kendall-Trendtests nach HAMED & RAO (1998) mit gleich langen Pegelreihen durchgeführt. Für jährliche mittlere Abflüsse (MQ_Jahr) zwischen 1978 und 2018 zeigt sich, dass an 74,3 % der Pegel die Abflüsse signifikant sinken. Für einen 70-jährigen Zeitabschnitt seit 1948 weisen nur 4,9 % der Pegel einen signifikant negativen Trend auf. Die Trends zu den niedrigsten jährlichen Abflüssen (NQ_Jahr) zeigen, dass 48,5 % der Pegel einen signifikant negativen Trend für den 40-jährigen Zeitabschnitt aufweisen (12,2 % für den 70-jährigen Zeitabschnitt). Für die Sommermonate ist für den 40-jährigen Zeitabschnitt zu erkennen, dass für mehr als 50 % der Pegel die Abflüsse in den Sommermonaten (MQ_Sommer, NQ_Sommer, NQ_April bis NQ_Juli) signifikant sinken (für mehr als 25 % für den 70-jährigen Abschnitt). Es wird deutlich, dass bei Betrachtung längerer Zeitabschnitte die Niedrigwasser-Entwicklung der letzten Jahrzehnte weniger stark ins Gewicht fällt. Dennoch sind für die Sommermonate auch bei Betrachtung der langen Zeitreihen zum Teil deutliche negative Trends zu verzeichnen.

Die Pardé-Koeffizienten zeigen seit 30 Jahren Verschiebungen, v. a. im Monat April hin zu trockeneren Perioden an, was auf immer früher einsetzende Wasserdefizite im Jahresverlauf hindeutet. Dies könnte auf die fehlenden Schneemengen zurückzuführen sein.

Durch den Klimawandel bedingt, kommt es zu einer Häufung von starken Niedrigwasserereignissen in Mitteleuropa (ROERS & WECHSUNG, 2015; LARINA & KRAHE, 2013). Diese Effekte können für die Region Thüringen in Bezug auf die Entwicklung seit den 1980er Jahren bestätigt werden. Hieraus wird ersichtlich, dass der Klimawandel nicht nur in großräumigen Einzugsgebieten eine Auswirkung auf den Wasserhaushalt hat, sondern auch auf der regionalen Skala eines Bundeslandes sichtbar ist. Dies ist bei Strategien und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu berücksichtigen.

Die vorgestellten Untersuchungen sind in den Aufbau des neuen Thüringer Niedrigwasserportals eingeflossen. Die aktuelle Niedrigwasserlage des Landes kann dort unter folgender Webseite abgerufen werden: <https://www.tlubn.thueringen.de/nw>.

Summary

Time series analysis were used to evaluate 122 gauges in Thuringian rivers for occurrence and magnitude of low flow periods. The results show, that extreme low flow periods occurred in almost every decade. Here, the years 1947/48, 1959, 1976, 1991, 2003 and 2018 are worth mentioning. Specifically, during the year 2018 the low flow period was extremely long lasting and regionally equally distributed over all gauges. However, with respect to low flow statistics the period of the year 1976 was not surpassed by that of the year 2018. The low flow period during 2018 showed the most extreme reoccurrence period since 1959 (15 years) based on NM30Q a rare return period similar to 1959 based on NM30Q (10 years).

A spatial analysis of the magnitude of the low flow periods shows that catchment with low altitude (e.g. Thuringian Basin) with little forest areas, small mean slopes and low precipitation are more affected by low flow periods. Conversely, catchments with high altitude, such as the Thuringian Forest, react less strong during low flow periods.

Mann-Kendall tendency tests were applied to discharge time series of equal length. For mean annual discharges between 1978 and 2018 for 74.3 % of the gauges the discharges decrease significantly. For the 70-year period since 1948, only for 4.9 % of the gauges show a significant negative trend. Significant negative trends based on the lowest yearly discharges were found for 53.5 % of the gauges for the 50-year period (12.2 % for the 70-year period). For the lowest discharge values during the summer months, a significant discharge decrease was observed for 50 % of the gauges during the 40-year period (> 30 % for the 70-year period). Obviously, using long time periods for evaluating low flow periods the last decades are less important. Nevertheless, even for long time series, distinct negative trends can be observed for the summer month.

The Pardé coefficient shows shifts since the last 30 years, especially in April, towards drier conditions, which indicates a shift towards earlier water deficits in the course of the year. This effect could be attributed to the lack of snow during winter.

Due to climate change, there is an increase of low discharge periods in Central Europe (ROERS & WECHSUNG, 2015; LARINA & KRAHE, 2013). These effects can be confirmed for the region of Thuringia. This shows that the effects of climate change are not limited to the water balance in large catchment areas, but are also visible on the regional scale of a federal state. This must be taken into account for strategies to adapting climate change.

The results of this study were used to establish a web-based low flow portal for Thuringia, where the current low flow situation can be retrieved: <https://www.tlubn.thueringen.de/nw>.

Anschriften der Verfasser

Dr.-Ing. Nico Trauth
Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH –
Niederlassung Leipzig
Dohnanyistraße 28, 04103 Leipzig
Tel.: 0341 962759-23
n.trauth@bjoernsen.de

Dr. Ralf Haupt
Thüringer Landesamt für Umwelt,
Bergbau und Naturschutz (TLUBN)
Referat 41, Hydrologischer Landesdienst,
Hochwassernachrichtenzentrale
Göschwitzer Straße 41, 07745 Jena
Tel.: 0361 573942-520
ralf.haupt@tlubn.thueringen.de

Literaturverzeichnis

- BCE (2020): Niedrigwasseranalyse 2018/2019 Thüringen – Entwicklung und Anwendung fortschreibbarer Bewertungsgrundlagen, Ergebnisbericht, Björnsen Beratende Ingenieure GmbH im Auftrag des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz, unveröffentlicht, Erfurt und Leipzig.
- DHI-WASY (2018): NQ-Regional Thüringen – Niedrigwasserregionalisierung, DHI-WASY GmbH im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, unveröffentlicht, Berlin.
- DWA (2020): Statistische Analyse von Niedrigwasserkenngrößen. Merkblatt DWA-M 541, Entwurf, Stand Oktober 2020, Hennef.
- HAMED, K.H. & A. RAO (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*. DOI 10.1016/S0022-1694(97)00125-X.
- HAUPT, R. (2004): Niedrigwasserabfluss im Sommer 2003 an Fließgewässern Thüringens – eine statistische Erstbewertung. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 48, 4, 170-175.
- HAUPT, R. (2008): Niedrigwasserabflüsse in Thüringen – Trends, Statistik, Regionalisierung. *Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie*, 82, Jena.
- IAWG (2017): Regionalisierung Thüringen, Stufe 1, Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik IAWG im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, unveröffentlicht, Ottobrunn.
- KOOP, J.H.E., BERGFELD, T. & M. KELLER (2007): Einfluss von extremen Niedrigwasser-Ereignissen und gleichzeitigen "Hitzeperioden" auf die Ökologie von Bundeswasserstraßen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 51, 5, 202-209.
- KORNHUBER, K., OSPREY, S., COUMOU, D., PETRI, S., PETOUKHOV, V., RAHMSTORF, S. & L. GRAY (2019): Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern. *Environmental Research Letters*. Bd. 14, Nr. 5, S. 054002. DOI: 10.1088/1748-9326/ab13bf.
- LARINA, M. & P. KRAHE (2013): Beobachtete Entwicklung extremer Niedrigwasserereignisse in Mitteleuropa. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Veranstaltungen 1/2013, Koblenz.
- MANN, M., RAHMSDORF, S., KORNHUBER, K., STEINMAN, B., MILLER, S., PETRI, St. & D. COUMOU (2018): Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification., *Science Advances*, 4, 10. DOI: 10.1126/sciadv.aat3272.
- NASA (2020): National Aeronautics and Space Administration (NASA), GISS Surface Temperature Analysis. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/zonal_means/ (Stand: 20.05.2020).
- PARDÉ, M. (1933): *Fleuves et rivières*. Paris.
- PIK (2018): Mehr Extremwetter durch die Störung gigantischer Luftströme in der Atmosphäre. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/mehr-extremwetter-durch-die-stoerung-gigantischer-luftstroeme-in-der-atmosphaere> (Stand: 02.07.2020).
- PIK (2019): Wetterextreme im Sommer 2018 waren verbunden durch stockende Riesenwellen im Jetstream. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, <https://www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/wetterextreme-im-sommer-2018-waren-verbunden-durch-stockende-riesenwellen-im-jetstream> (Stand: 02.07.2020).
- PSU (2018): Pennsylvania State University: Controlling future summer weather extremes still within our grasp. <https://news.psu.edu/story/545128/2018/10/31/research/controlling-future-summer-weather-extremes-still-within-our-grasp> (Stand: 17.06.2020).
- ROERS, M. & F. WECHSUNG (2015): Neubewertung der Auswirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Elbegebiet. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 59, 3, 109-119.
- TRAUTH, N. & R. HAUPT (2021): Niedrigwasserabflüsse an Pegeln. In: *Niedrigwasser und Trockenheit in Thüringen*. Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz, Schriftenreihe, 120, S. 130-177, Jena.
- YUE, S., PILON, P. & G. CAVADIAS (2002): Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*. Bd. 259, Nr. 1, S. 254-271. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00594-7.