



Statistische Methoden zur hydrologischen Klimawandelanalyse der Vergangenheit

Übersicht

Stand: 06/2020

Statistische Methoden helfen, den mittleren Zustand von Klima- und Wasserhaushaltsgrößen zu charakterisieren. Weiterhin lässt sich mit ihnen nachweisen, ob es über die Zeit zu einer Veränderung gekommen ist. Hier sind die gängigsten Methoden beschrieben, die das LfU innerhalb der Kooperation KLIWA¹ zur Trendanalyse in der Hydrologie verwendet.

Untersucht werden dabei die gebräuchlichen Abflusskenngrößen (KLIWA 2016), wie der mittlere Abfluss MQ oder der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ (siehe auch LfU 2020), aber auch Kenngrößen der Wassertemperatur (LfU 2013), der Wasserbilanz bzw. des Bodenwasserhaushalts (KLIWA 2017, 2012) oder Grundwasserstände und Quellschüttungen (KLIWA 2011). Die im Literaturverzeichnis genannten Fachberichte enthalten noch detailliertere Informationen. Wichtige methodische Festlegungen für KLIWA Bayern sind im Text **blau** hervorgehoben.

1 Mittelwert und Variabilität der Vergangenheit

Der Mittelwert einer Kenngröße beschreibt das durchschnittliche Verhalten eines Systems. In der Klimabetrachtung berechnet man Mittelwerte üblicherweise über mindestens 30 Jahre. **Der Standard-Referenzzeitraum in KLIWA ist 1971 bis 2000 (Abb. 1).** Dieser feste Zeitraum ist notwendig, um die Auswertungen zu Veränderungen miteinander vergleichen zu können.

Je nach Fragestellung kommen aber auch andere Mittelungszeiträume zur Anwendung. So wurde in der Bodenwasserhaushaltsmodellierung auch der Zeitraum 1951 bis 2010 als langjähriger durchschnittlicher Zustand ausgewertet (Abb. 2). Demgegenüber stehen Mittelwerte über einzelne Jahrzehnte, um kurzfristigere Phasen bestimmter Eigenschaften besser erfassen zu können. Um zu wissen, was der neue durchschnittliche Zustand ist, bildet man auch Mittelwerte der jüngsten Vergangenheit und stellt sie dem Standard-Referenzzeitraum gegenüber.

Ein Mittelwert gilt nur innerhalb des Zeitraums, für den er berechnet wurde. Für andere Zeiträume kann dieser Mittelwert höher oder niedriger liegen. Das hat zwei Gründe:

- a) Die Zeitreihe der Kenngröße kann bereits einen Trend enthalten. Ist dieser Trend beispielsweise zunehmend, ist der Mittelwert eines jüngeren Zeitraums (z.B. 1986-2015) höher als der Mittelwert eines älteren Zeitraums (z.B. 1971-2000). Das ist unter anderem für die Wassertemperatur der Fall, die dem klimawandelbedingten Trend einer steigenden Lufttemperatur folgt (Abb. 1).
- b) Es gibt eine natürliche Variabilität der Kennwerte. Durch die Prozesse des globalen Witterungsgeschehens sind aufeinanderfolgende Jahre unterschiedlich warm und unterschiedlich niederschlagsreich. Das wirkt sich auch auf die Hydrologie aus: Die Kennwerte schwanken von Jahr zu Jahr. Zum Teil gibt es auch mehrjährige Phasen mit ähnlichen Werten. Darüber hinaus kann auch die wasserwirtschaftliche Nutzung zu Schwankungen führen, welche die natürlichen Schwankungen abschwächen oder verstärken. Durch diese Variabilität unterscheiden sich Mittelwerte folglich auch je nach Beginn und Ende des Mittelungszeitraumes (Abb. 2).

¹ Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (www.kliwa.de)

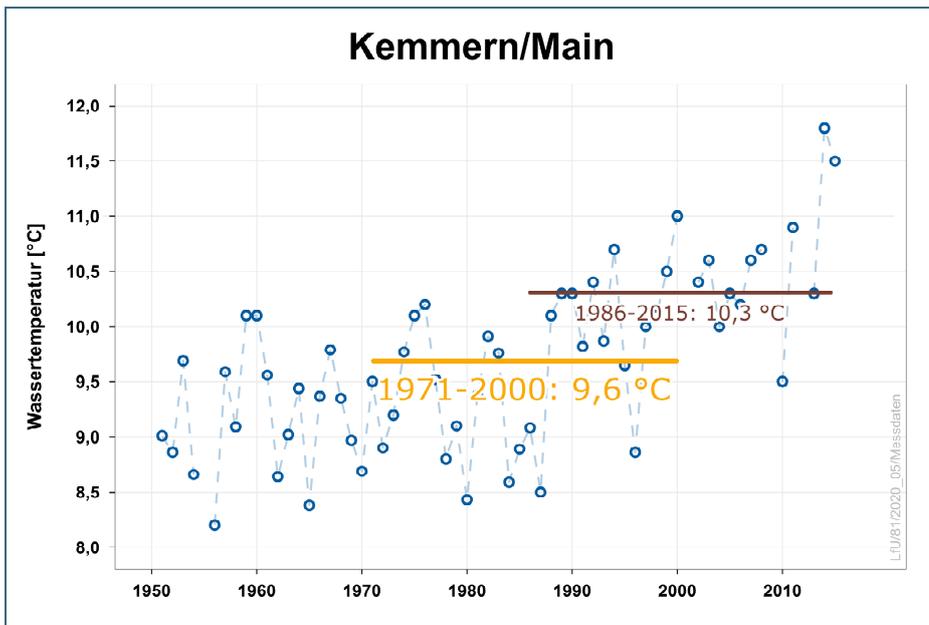


Abb. 1:
Beispiel zum Unterschied von Mittelwerten bei Zeitreihe mit vorhandenem Trend: Mittlere jährliche Wassertemperatur an der Messstelle Kemmern – Mittelwerte über zwei 30-jährige Zeiträume

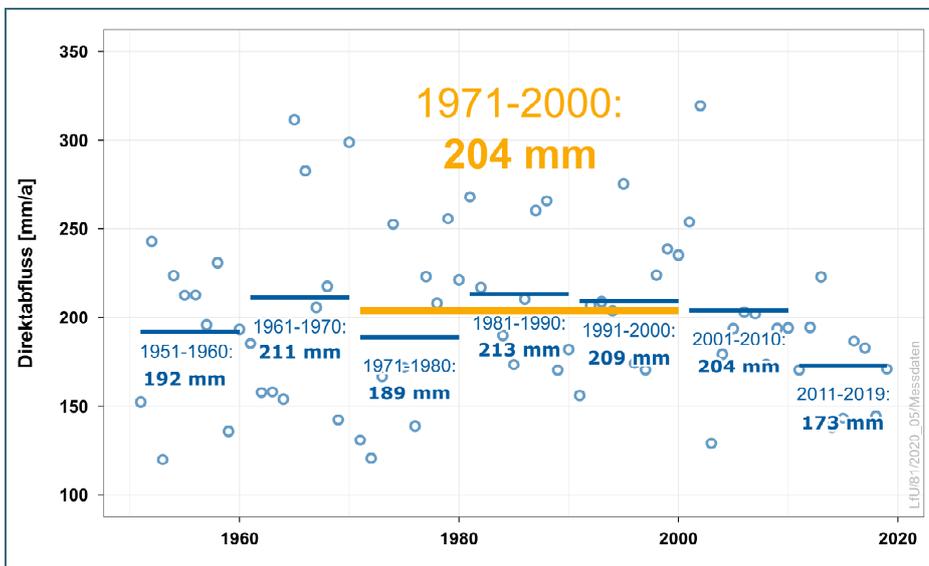


Abb. 2:
Beispiel zum Unterschied von Mittelwerten bei Zeitreihe mit „natürlicher“ Variabilität: Direktabfluss in Bayern – Mittelwerte über 10-jährige Zeiträume bzw. über den 30-jährigen Standard-Referenzzeitraum 1971-2000

2 Trend

2.1 Grundlegendes zur Trendberechnung

Die Trendberechnung besteht immer aus zwei Elementen: Der Prüfung, ob ein signifikanter Trend vorliegt (siehe Kapitel 2.3) und der Berechnung eines kommunizierbaren Wertes, der Richtung und Stärke der Änderung angibt (siehe Kapitel 2.2). Der Begriff „Stärke“ meint die Wertänderung innerhalb eines Zeitabschnitts und kann für lineare Trends mit dem Anstieg der Trendgeraden gleichgesetzt werden.

Dieser Steckbrief kann die vielfältigen und zum Teil komplexen Methoden nur kurz anreißen, Details sind den Fachberichten oder spezieller Literatur zur Statistik zu entnehmen.

Die Grafiken der LfU-Website Klima und Wasser geben das gewählte Trendberechnungsverfahren üblicherweise als Fußnote an. Ein häufig in KLIWA verwendetes Verfahren ist der Mann-Kendall-Signifikanztest mit Angabe des Trendwertes als linearer Trend. Das gilt vor allem für den KLIWA-Monitoringbericht (KLIWA 2016).

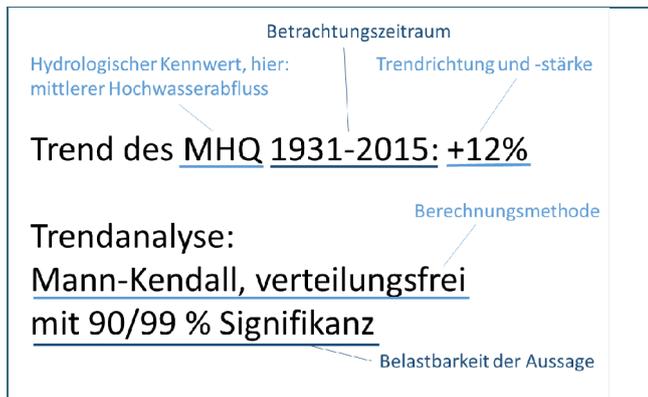


Abb. 3:
Typische Trendangabe in LfU-Grafiken

2.1.1 Berechnungszeitraum

Genauso wie ein Mittelwert gilt auch ein Trend nur für den Zeitraum, für den er berechnet wurde. Neben der Variabilität der Kennwerte können sich Entwicklungen im zeitlichen Verlauf beschleunigen, verzögern oder auch umkehren. Einen Trend damit direkt auf frühere oder spätere Zeiträume zu verlängern, geht daher nicht. Spezielle Darstellungsformen, wie Trenddreiecke (KLIWA 2017), eignen sich zu beurteilen, wie stabil ein Trend ist.

Ein gängiger Trendberechnungszeitraum in KLIWA für Klimagrößen sowie Mittel- und Hochwasserabfluss ist 1931 bis 2015. Für die jüngere Vergangenheit gilt häufiger auch 1980 bis 2015.

2.1.2 Berechnungsverfahren

Um einen Trend mit seinen beiden Aspekten Signifikanz (Belastbarkeit der Aussage, Kap. 2.3) und Stärke zu berechnen, gibt es eine Vielzahl an Methoden. Denn jedes statistische Verfahren erkennt einen tatsächlich vorhandenen Trend nur so gut, wie es auch für die jeweilige Fragestellung geeignet ist. Hier spielt zum Beispiel die Häufigkeitsverteilung eines betrachteten Kennwertes eine Rolle oder die Autokorrelation² innerhalb der Zeitreihe. Zum dritten ist wichtig, welche Form der Trend hat: Zum Beispiel linear, logarithmisch oder exponentiell. Demnach unterscheidet sich auch die Komplexität der Trendberechnungsmethoden.

Welches Verfahren in der Praxis Anwendung findet, hängt aber nicht nur von den drei zuvor genannten statistischen Rahmenbedingungen ab, sondern auch von Festlegungen aufgrund praktikabler Erwägungen. Dies kann die Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen sein, der Arbeitsaufwand oder eine gute Kommunizierbarkeit. Demnach muss zuweilen einem einfacheren Verfahren den Vorzug gegenüber dem bestmöglichen Verfahren gegeben werden.

In Bezug auf die oben genannte Rahmenbedingung „Häufigkeitsverteilung“ sollten Signifikanztests also so gewählt werden, dass sie für die Verteilung der untersuchten Daten geeignet sind. Tägliche Luft- und Wassertemperaturen sind zum Beispiel üblicherweise normalverteilt, tägliche Niederschlagsdaten linksschief. Für normalverteilte Daten eignen sich parametrische Signifikanztests, wie der t-Test. Ist die Verteilung unbekannt, oder sollen in einer Untersuchung Datenreihen verschiedener Verteilungsfunktionen mit dem gleichen Verfahren ausgewertet werden, bieten sich sogenannte nicht-parametrische Tests an, wie der Mann-Kendall-Test.

Auf den Mann-Kendall-Test gehen alle Trendangaben des KLIWA-Monitoringberichtes zurück: Temperatur, Niederschlag, mittlerer, Hoch- und Niedrigwasserabfluss.

Jüngere Veröffentlichungen des LfU zu Trends von Wassertemperatur und Niedrigwasser gehen meist auf eine andere Studie zurück, in der die Verteilung der Daten genauer analysiert wurde. So sind jährliche Niedrigstabflüsse oder jährliche maximale Wassertemperaturen extremwertverteilt. Über- oder Unterschreitungshäufigkeiten von Schwellenwerten folgen der Tobit-Verteilung. Die gewählten Trendmodelle berücksichtigen dies. Darüber hinaus wurde beachtet, dass tägliche und monatliche Werte autokorreliert sind – sie hängen also von den Werten der

² Bei Autokorrelation hängt ein Wert von dem Wert des vorangegangenen Zeitschrittes ab. Da sich beispielsweise die Temperatur eines Gewässers nur langsam ändern kann, ergibt sich dessen aktuelle Tagesmitteltemperatur immer auch mit aus der Temperatur des Vortages.

vorangehenden Zeitschritte ab. Auch für die Analyse von Grundwasserständen und Quellschüttungen fanden in KLIWA-Heft 16 (KLIWA 2011) ähnliche angepasste Trendberechnungsmethoden Anwendung. Sie berücksichtigen beispielsweise innerjährliche Schwankungen oder auch mehrjährige Phasen ähnlichen Verhaltens, die sich in den Zeitreihen als Sprünge oder Punkte der Trendumkehr äußern.

2.1.3 Trendursachen

Ein statistisch belastbarer Trend sagt noch nicht aus, was ihn hervorruft, ob er beispielsweise auf den Klimawandel zurückgeht oder ob ihn auch andere Effekte überlagern. Die Gewässer sind stark durch die menschliche Nutzung überprägt: Gereinigtes Abwasser aus Kläranlagen führt einem Fließgewässer in Niedrigwasserzeiten Wasser zu oder Wärmeeinleitungen erhöhen die Wassertemperatur. Beides führt zu einem steigenden Trend, der mögliche Änderungen durch den Klimawandel verstärken, aber auch abschwächen kann. Sinkende Grundwasserstände können sowohl auf eine verringerte Grundwasserneubildung als auch eine verstärkte Grundwasserentnahme zurückgehen.

Um Trendursachen belegen und quantifizieren zu können, kommen andere statistische Verfahren zur Anwendung, die hier nicht näher erläutert werden (z. B. Regressions- oder Hauptkomponentenanalyse). Da dafür zumeist eine sehr gute Datenbasis zu möglichen Einflussfaktoren benötigt wird, ist dies sehr aufwendig.

2.2 Linearer Trend

Der lineare Trend kann verwendet werden wenn sich der untersuchte Kennwert gleichmäßig mit der Zeit ändert.

Der Trendwert ergibt sich wie in Abb. 4 exemplarisch anhand der monatlichen Wassertemperatur (WT) gezeigt. Die Gerade verläuft so durch die gemessene Zeitreihe, dass sie den Verlauf der Messwerte mit insgesamt möglichst geringer Abweichung trifft. Anschließend berechnet man die Differenz Δ WT des Wertes zwischen Anfang und Ende der Geraden innerhalb der untersuchten Zeitperiode. Diese „Stärke“ des Trends gibt man dann als Wertänderung pro Zeitraum an (z. B. 1,76 °C pro 65 Jahre). Eine weitere gängige Angabe ist als Anstieg der Geraden (z.B. 0,27 °C/Jahrzehnt), wofür die Differenz durch die Anzahl der Jahre Δ Zeit geteilt und anschließend mit 10 multipliziert wird.

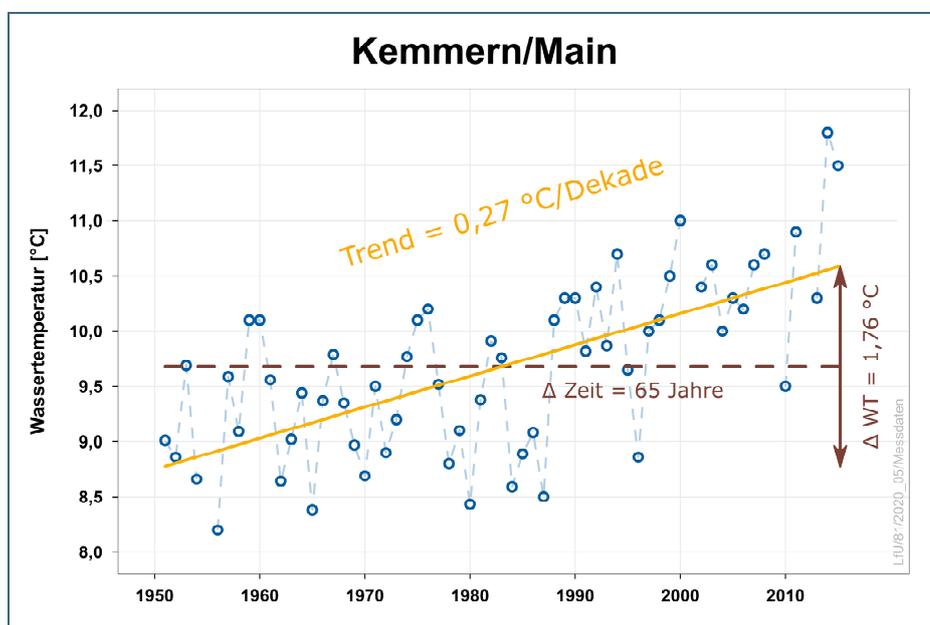


Abb. 4:
Ermittlung der Klimaveränderung als linearer Trend an Beispiel der mittleren jährlichen Wassertemperatur an der Messstelle Kemmern

Beim Abfluss wird der Trend häufig als prozentuale Veränderung vom langjährigen Mittelwert (relative Änderung) angegeben. Das heißt, man berechnet zunächst eine Zeitreihe, die die Abweichung jedes gemessenen Wertes vom langjährigen Mittelwert darstellt und bildet danach erst den Anstieg der Trendgeraden. Ein Anstieg von 10 m³/s Abfluss ergäbe bei einem langjährigen Mittel von 100 m³/s einen relativen Trend von 10 %.

Bei der Interpretation prozentualer Änderungen ergibt sich folgende Herausforderung: Ist ein langjähriger Mittelwert klein, führt die Angabe eines prozentualen Trends unter Umständen zu hohen relativen Werten – selbst wenn die

absolute Änderung nicht groß ist. Das ist beispielsweise bei der Berechnung von relativen Trends von Monatswerten in kleinen Gewässern der Fall: Eine absolute Abflussänderung von 1 m³/s würde in Monaten mit natürlicherweise geringem Abfluss (z. B. 5 m³/s) eine relative Änderung von 20 % bedeuten, in Monaten mit hohem Abfluss (z. B. 10 m³/s) nur eine Änderung von 10 %.

2.3 Statistische Signifikanz

Die statistische Signifikanz sagt aus, ob es sich bei dem Trend eines Kennwertes um eine mit statistischen Methoden abgesicherte Veränderung handelt und nicht um eine scheinbare Veränderung, die innerhalb der Variabilität der Werte liegt.

Ein Ergebnis eines Signifikanztests ist der sogenannte p-Wert. Er liegt zwischen 0 und 1. Je kleiner dieser Wert, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Irrtum vorliegt – der Trend also nur zufällig als ein solcher detektiert wurde. Nichtsdestoweniger bedarf es einer Grenze, wie hoch die Irrtumswahrscheinlichkeit maximal sein darf. Alle Trends mit p-Werten unterhalb dieser Grenze sind signifikant, also statistisch belastbar nachgewiesen. Angegeben wird die sogenannte Signifikanzgrenze allerdings meist rückwärts gerechnet von 100 %. Demzufolge gilt: Je höher die Grenze desto belastbarer der Trend (Abb. 5). Eine gängige Signifikanzgrenze in der Statistik liegt bei 95 %. Dies entspricht 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit. Alle Trends mit p-Werten <0,05 gelten damit als signifikant. Wo die Grenzen gesetzt werden, ist letztlich immer eine Entscheidung des Bearbeiters.

Das LfU unterscheidet in KLIWA zwei Signifikanzgrenzen:

- 90 % = signifikant
- 99 % = hoch signifikant

Die Trendauswertungen des KLIWA-Monitoringberichtes (KLIWA 2016) nutzen eine andere Aufteilung und betrachten auch Trends ab einer Grenze von 80 % als signifikant.

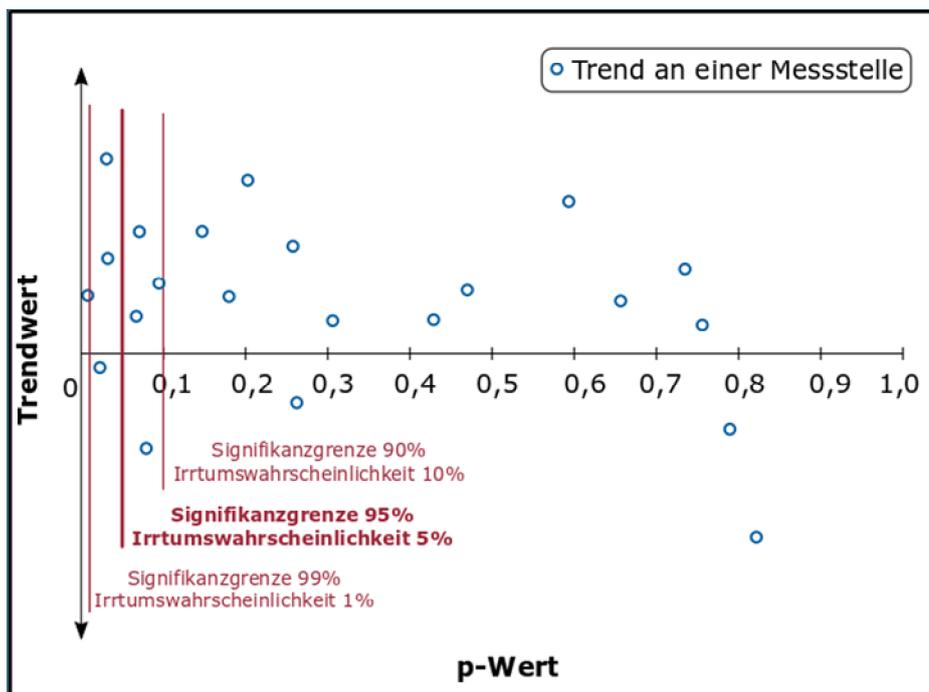


Abb. 5:
Schema zur Interpretation der Signifikanzgrenze. Das Beispiel zeigt eine fiktive Trendanalyse für 22 Messstellen.

Legt man die Signifikanzgrenze auf 95 %, kann man 4 Trendwerte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % als abgesichert ansehen, 3 positive und eine negative Entwicklungsrichtung.

Liegt die Signifikanzgrenze höher (bei 99%), ist nur ein Wert abgesichert, das aber mit einer geringen Irrtumswahrscheinlichkeit. Liegt die Grenze niedriger (90 %), sind 8 Trendwerte statistisch belastbar, wenn auch mit einer höheren Irrtumswahrscheinlichkeit.

3 Literaturverzeichnis

KLIWA, KLIMAVÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2011): Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Projekt A 2.3.1 "Analyse des Langzeitverhaltens von Grundwasserständen"; KLIWA-Projekt A 2.3.2 "Analyse des

Langzeitverhaltens von Quellschüttungen"; KLIWA-Projekt A2.3.3 "Analyse des Langzeitverhaltens des grundwasserbürtigen Abflusses". KLIWA-Berichte, Heft 16, 149 S.

KLIWA, KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden- Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Berichte, Heft 17, Karlsruhe, 112 S.

KLIWA, KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2016): Langzeitverhalten von Abfluss-Kennwerten an ausgewählten Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz - Grundlage für den Monitoringbericht 2016.

KLIWA, KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2017): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015). KLIWA-Berichte, Heft 21.

LFU, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2013): Langzeitverhalten der Wassertemperaturen bayerischer Fließgewässer. Klimawandel und Wasserhaushalt in Bayern. Augsburg, 8 S.

LFU, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2020): Hydrologische Kenn- und Schwellenwerte. Begriffserläuterungen und Methodik für Auswertungen am LfU/ KLIWA. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/auswirkungen/niedrigwasserabfluesse/index.htm.