

Wann ist ein Trend ein Trend? - Überlegungen zu Trends und Sprungstellen in Zeitreihen

In zwei unterschiedlichen F&E-Projekten in Nordrhein-Westfalen wurden Instationaritäten (Trends und Sprungstellen) in langen Niederschlagsmessreihen untersucht. Die hier gemeinsam vorgestellten Ergebnisse gehen der Frage nach, wann eine Zunahme des Niederschlages als Trend einzustufen ist und wann nicht. Es wird gezeigt, dass Sprungstellen bei Betrachtung der Statistik kurzer Dauerstufen auftreten, die nicht eindeutig auf Änderungen der Messtechnik zurückzuführen sind.

Thomas Einfalt, Benedikt Rothe, Tobias Gehrman, Fabian Netzel, Vera Schimetzek und Markus Quirnbach

1 Hintergrund

Im Jahr 2010 wurde das F&E-Vorhaben „Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW“ (ExUS2010) für den Zeitraum 1950 bis 2008 durchgeführt. Dabei traten erste Hinweise zu Tage, dass Änderungen in den Eigenschaften von Niederschlagsdatenreihen neben dem Klimawandel auch einer Änderung der Messsysteme zugeschrieben werden können. Zu dieser Fragestellung wurden im F&E-Vorhaben „Untersuchungen zur Anwendung von instationären Bemessungsansätzen in der wasserwirtschaftlichen Praxis“ (UnIWa) und in der Aktualisierung des Projektes ExUS in 2020 weitere Untersuchungen durchgeführt.

2 Instationäre Eigenschaften von Messdatenreihen an Niederschlagsstationen

Bei der Untersuchung langer Messdatenreihen wurden die zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten an einzelnen Stationen in der Regel mit unterschiedlichen Messtechniken erhoben, die über die Jahrzehnte zum Einsatz gekommen sind. Bei der kontinuierlichen Niederschlagsmessung sind dies Geräte mit Papieraufschrieb, Kippwaagen („Wippen“, seit ca. 1990) und im Anschluss automatisierte Wägegeräte (ab ca. 2000). Der Zeitpunkt eines Messgeräteewechsels ist dabei von der verfügbaren Technik

sowie vom jeweiligen Betreiber abhängig und kann den Metadaten (Stammdaten) der jeweiligen Station entnommen werden.

Es ist bekannt, dass insbesondere Niederschlagsmengen kurzer Dauerstufen (fünf Minuten bis zu einer Stunde) je nach Messverfahren, Betreiber und Verarbeitung in unterschiedlicher Qualität vorliegen [1], [2], [3], [4]. Ein Mittel, um die Unterschiede zwischen den einzelnen Messsystemen insbesondere in den kürzeren Dauerstufen sichtbar zu machen, ist die Untersuchung von extremen Niederschlägen, zum Beispiel in Form von jährlichen oder partiellen Serien.

Eine sichtbare und durch Verfahren, wie den Mann-Kendall-Test, als Trend detektierbare Instationarität in langen Datenreihen ist also eine Kombination aus Änderungen in Klima, Messtechnik und Datenverarbeitung. Ein automatisches Detektieren von Trends und Sprungstellen in Messreihen ist aus Betreibersicht aufgrund einer stetig wachsenden Menge an Messdaten erwünscht, damit Daten fachgerecht eingesetzt werden können.

3 Prüfverfahren zur Detektion von Sprungstellen

Als Prüfverfahren zur Detektion von abrupten Änderungen in der Messtechnik, d. h. einer Sprungstelle, wurden in UnIWa diverse Verfahren erprobt. Die genauesten Ergebnisse lieferte der Wilcoxon-Rangsummentest in Kombination mit einem Test zur Unterscheidung zwischen Trend und Sprungstelle. Der Wilcoxon-Rangsummentest ist ein nicht-parametrischer Test, der auf Rängen basiert. Dieser Test erkennt zuverlässig Instationaritäten im Mittelwert. Es handelt sich um einen Hypothesentest: Die Nullhypothese nimmt an, dass die Zeitreihe stationär ist. Die Alternativhypothese besagt, dass eine Instationarität bzw. eine mögliche Sprungstelle in der Zeitreihe enthalten ist. Der Wilcoxon-Rangsummentest diente zur Detektion des Zeitpunkts der potenziellen Sprungstelle.

Dieses Verfahren nach Wilcoxon unterscheidet jedoch nicht zwischen Trend und Sprungstelle. Zu dieser Unterscheidung wurde ein Verfahren entwickelt, welches auf Sen's Slopes basiert.

Kompakt

- Eine Instationarität in einer Niederschlagsdatenreihe kann automatisch festgestellt werden.
- Die Zeitpunkte abrupter Instationaritäten in Datenreihen können nicht allgemein mit Messgeräteechseln gleichgesetzt werden.
- Die entwickelten Verfahren zur Sprungstellendetektion sollten im Hinblick auf praxisgerechte Anwendungen weiterentwickelt werden.



Bild 1: Vorgehensweise zur Detektion von Sprungstellen

Dieses Verfahren untersucht, ob sich die Messwerte bis zur potenziellen Sprungstelle signifikant von den Messwerten nach der möglichen Sprungstelle unterscheiden. Dazu wird die Zeitreihe am Zeitpunkt des maximalen Rangunterschieds geteilt, für beide Teile wird separat die Steigungsgerade nach Sen's Slopes berechnet. Die Steigungsgerade des ersten Teils ist definiert als $g_1(t) = b_1 t + a_1$ und die Steigungsgerade des zweiten Teils als $g_2(t) = b_2 t + a_2$. Es sei t_c der Zeitpunkt der Trennstelle. Die Teststatistik ist definiert als

$$S_c = |g_2(t_c) - g_1(t_c)|$$

Weiterhin werden mittels Maximum-Likelihood-Schätzung die Parameter (γ, μ, σ) der Generalisierten Extremwertverteilung (GEV) mit instationärem Lageparameter μ an die Zeitreihe angepasst. Es werden 10 000 $GEV(\gamma, \mu, \sigma)$ -verteilte Zeitreihen mit der-

selben Anzahl an Messwerten wie die untersuchten Beobachtungsdaten erzeugt, und für jede dieser Zeitreihen wird für denselben Zeitpunkt die obige Statistik berechnet. Falls die Statistik S_c der zu testenden Zeitreihe größer ist als das 100%- α -Perzentil der Statistiken der zufällig erzeugten Zeitreihen, besitzt die Zeitreihe zum Signifikanzniveau α eine Sprungstelle. Ansonsten kann nicht bewiesen werden, dass die vorliegende jährliche Serie eine Sprungstelle besitzt und die Instationarität wird als Trend betrachtet. **Bild 1** zeigt eine Übersicht über die beschriebene Vorgehensweise.

4 Ergebnisse

Bei den Untersuchungen in UnIWa zeigte sich, dass viele Instationaritäten die Charakteristik einer Sprungstelle aufweisen. Das im

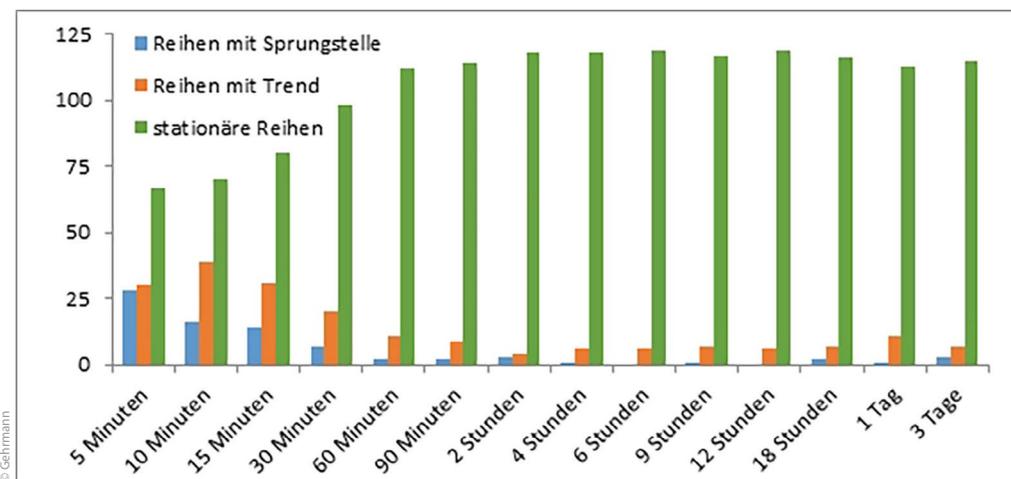


Bild 2: Vergleich Anzahl Reihen mit Sprungstelle, Trend sowie stationäre Reihen, Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$

vorherigen Kapitel beschriebene Verfahren wurde auf 125 Niederschlagsstationen für 18 Dauerstufen (mit einer Länge zwischen 5 Minuten und 3 Tagen) angewendet. Der Wilcoxon Rangsummentest detektierte in 298 von 2 250 ($\hat{=} 18 \cdot 125$) jährlichen Serien eine Instationarität. Die Ergebnisse des Wilcoxon-Rangsummentests (stationär/instationär) stimmten weitestgehend mit den Ergebnissen des Mann-Kendall-Tests überein (Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$). 97 dieser insgesamt 298 durch den Wilcoxon-Rangsummentest detektierten Instationaritäten wurden als Sprungstelle zum Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ erkannt. Die Anzahl detektierter Sprungstellen nimmt im Wesentlichen mit zunehmender Länge der Dauerstufe ab. Das Verfahren detektierte in 11-22 % der Zeitreihen in den 5- bis 15-Minuten-Dauerstufen und in 2-7 % der Zeitreihen in den 20- bis 60-Minuten-Dauerstufen eine Sprungstelle. Es zeigte sich weiterhin, dass insbesondere Zeitreihen mit einer Länge von mehr als 30 Jahren eine Sprungstelle aufweisen. In **Bild 2** sind die Ergebnisse für verschiedene Dauerstufen aller untersuchten Reihen dargestellt. Es ist deutlich sichtbar, dass erkannte Instationaritäten, sowohl als Trend als auch als Sprungstelle, mit wachsender Dauerstufe abnehmen.

In **Bild 3** ist grafisch dargestellt, in welchen Jahren Sprungstellen ermittelt wurden. Die meisten Sprungstellen wurden Anfang bis Mitte der 1990er-Jahre detektiert. Zwischen 1991 und 1998 erkannte das Verfahren 59 Sprungstellen zum Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$. In den 1980er-Jahren und im Jahr 1990 wurden insgesamt 12 Sprungstellen ermittelt und von 1999-2008 insgesamt 26.

Während im F&E-Vorhaben UniWa die Werte von jährlichen Serien analysiert wurden, untersuchte ExUS2020 Auftretenshäufigkeiten pro Jahr von Ereignissen in partiellen Serien. Für einen Vergleich von 21 ausgewählten Stationen in NRW wurden beide Ansätze zur Detektion von Sprungstellen verwendet, jeweils für $D = 5$ Minuten und $D = 60$ Minuten.

Die gewählten Stationen sind über ganz NRW verteilt und stammen von unterschiedlichen Betreibern (**Tabelle 1**).

Die Berechnung fand mit derselben Software statt, die in UniWa eingesetzt wurde: dem Programmpaket TimeView, für das die Funktionsweise des Tests in Mudersbach et al. [5] näher beschrieben ist.

Nach der Berechnung sind die Reihen in drei Kategorien eingeteilt:

- Sprungstelle gefunden zu einem Zeitpunkt (in **Tabelle 1** mit Datum),
- Reihe instationär, aber keine Sprungstelle signifikant erkannt,
- Reihe stationär (in **Tabelle 1** mit „nein“ gekennzeichnet).

Die Ergebnisse dieses Vergleichs können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Berechnungen für die partielle Serie und die jährliche Serie zeigen, dass ca. 2/3 aller Fälle gleich klassifiziert werden (d. h. instationär mit Sprungstelle, instationär ohne Sprungstelle oder stationär).
- Nicht alle Gerätewechsel erzeugen Instationaritäten in Form von Sprungstellen in den Messreihen.
- Erkannte Sprungstellen entsprechen häufig nicht dem Zeitpunkt eines Gerätewechsels (nur in zwei der untersuchten Fälle).
- Die Ergebnisse der beiden Untersuchungen entsprechen einander im Wesentlichen, ganz gleich, ob die jährlichen Auftretenshäufigkeiten von Ereignissen in der partiellen Serie oder die Werte der jährlichen Serie untersucht werden.

5 Diskussion

Ein Blick auf die Datenreihe der Station A (**Bild 4**), die anhand des oben beschriebenen Testverfahrens als stationär eingeordnet wurde, zeigt, dass hier ein Unterschied zwischen der Datenreihe vor und nach Wechsel des Messgerätes sowohl visuell als auch bei Betrachtung von Mittelwert und Standardabweichung sichtbar ist. In **Bild 4** dargestellt sind die Anzahl an Elementen der partiellen Serie pro Jahr. Der erkennbare Unterschied in Mittelwert und Standardabweichung lässt sich mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test überprüfen und ist für die dargestellte Station A statistisch signifikant: es kann nicht angenommen werden, dass die Grundgesamtheiten identisch sind.

An diesem Beispiel wird deutlich, dass Vorwissen aus den Stammdaten sinnvoll für statistische Tests genutzt werden kann, und dass Sprungstellen nicht nur über Unterschiede in den Mit-

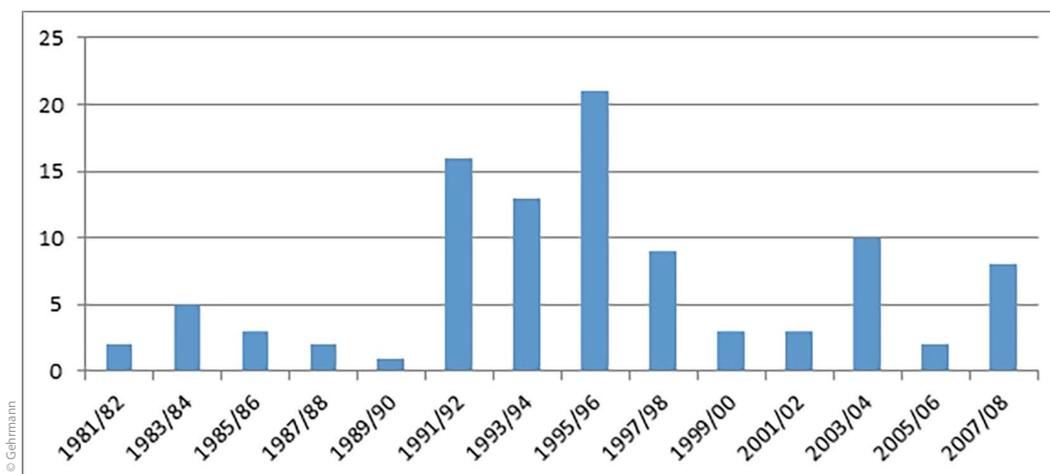


Bild 3: Anzahl Sprungstellen je Doppeljahr, Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$

Tabelle 1: Übersicht über geprüfte Stationen zu Bruchpunkten in der Statistik (Quelle: Einfalt)

Station	partielle Serie		jährliche Serie		letzter Gerätewechsel
	5 Min	60 Min	5 Min	60 Min	
Wuppertal Buchenhofen	01.01.1989	nein	01.01.1989	instationär	16.05.2000
Zingsheim	01.11.1998	nein	01.01.1999	nein	18.12.1995
St. Arnold	01.01.1997	nein	instationär	nein	25.06.2003
Essen BRW LANUV	01.01.1993	01.01.1996	01.01.1994	01.01.1996	15.08.2003
Bottrop Eigen	nein	nein	nein	nein	01.01.1988
Dortmund-Aplerbeck	nein	nein	nein	nein	16.08.1993
Oberhausen-Buschhausen	nein	instationär	nein	01.01.2001	01.07.1998
Rehringhausen	01.01.1978	01.01.1991	01.01.1988	nein	19.12.1998
Angertal KA	01.01.1995	nein	nein	nein	keiner
Lüdinghausen	nein	01.01.1999	nein	nein	01.10.2005
Hagen Mäckinger Bach	01.01.1995	instationär	instationär	instationär	26.11.2002
Oleftalsperre	01.01.1992	nein	01.01.1988	01.01.2005	01.11.1994
Geldern KA	instationär	01.01.1999	01.01.1998	01.01.1997	keiner
Bochum DMT	nein	nein	nein	instationär	keiner
Eicherscheid	nein	nein	nein	nein	11.07.2001
Goch KA	instationär	01.01.1999	instationär	nein	keiner
Minden StUA	nein	nein	nein	nein	18.03.2002
Hagen Holthausen	01.01.1999	nein	instationär	nein	06.08.2003
D-Gerresheim	nein	nein	nein	nein	03.03.1994
Schevelinger Talsperre	nein	instationär	nein	instationär	01.11.2001
Beventalsperre	instationär	instationär	instationär	nein	01.05.2002

telwerten vor und nach Gerätewechsel identifiziert werden können. Insbesondere können statistische Tests eine größere Anzahl von Kandidaten für Sprungstellen finden, für deren Auswahl Kenntnisse zur Gerätehistorie hilfreich sind.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es gibt Verfahren, die eine Instationarität in einer Niederschlagsdatenreihe automatisch feststellen können. Hierbei wird

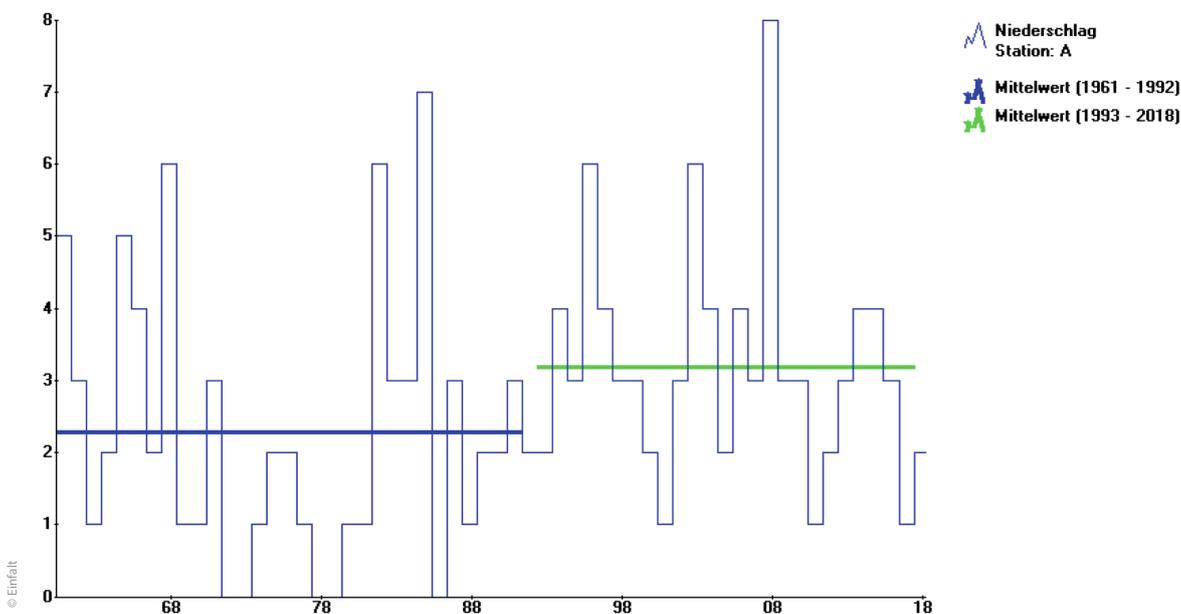


Bild 4: Partielle Serie einer Station mit getrennten Mittelwerten vor und nach dem Gerätewechsel

im vorgestellten Verfahren auf einem Test der Stationarität des Mittelwertes der Daten aufgebaut.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass für bestimmte Datenkonstellationen eine gemeinsame Prüfung von Mittelwert und Standardabweichung einen nennenswerten Erkenntnisgewinn bringt.

Das Erkennen von Zeitpunkten eines Gerätewechsels in den Daten ist aus verschiedenen Gründen schwierig: Zum einen gibt es nicht immer um den Zeitpunkt des Gerätewechsels signifikante Ereignisse, die eine Identifizierung möglich machen. Zum zweiten sind die Stammdaten der Stationen nicht immer genügend aussagekräftig und zum dritten können sowohl zufällige Ereignisse dazu führen, dass Instationaritäten erkannt werden als auch Gerätewechsel ohne signifikante Änderung der Daten ablaufen.

Aus diesen Gründen ist die Aufgabe, Sprungstellen in den Daten automatisch zu identifizieren, noch immer nicht umfänglich genug gelöst. Weitere Arbeiten werden sich deshalb voraussichtlich befassen mit:

- Genaueren Analysen der Stammdaten der Stationen und Untersuchung weiterer Zusatzinformationen,
- Weiteren Testverfahren, die zusätzliche Eigenschaften der Reihen prüfen,
- Sensitivitätsuntersuchungen der Tests, unter anderem durch Variation des Signifikanzniveaus.

Darüber hinaus sollte eine allgemeine Vorgehensweise zur Detektion sowie Unterscheidung von Trends und Sprungstellen entwickelt werden.

Hieraus können dann Praxisanleitungen erstellt werden, zum Beispiel welche Daten wofür verwendet werden können, wie man das erkennen kann, mit welchen Folgen man beim Einsatz bestimmter Messverfahren rechnen muss und wie die Testverfahren für die Datenvalidierung verwendet werden können.

Autoren

Dr. Thomas Einfalt

hydro & meteo GmbH
Breite Str. 6-8
23552 Lübeck
einfalt@hydrometeo.de

Thomas Einfalt, Benedikt Rothe, Tobias Gehrmann, Fabian Netzel, Vera Schimetzek and Markus Quirnbach

When can you call a trend a trend? - Considerations on trends in time series

Long time series of precipitation measurements have been investigated for instationarities (trends and change points) in two different projects in North Rhine-Westphalia. The results that are presented here together are focused around the question when an increase of precipitation can be considered a trend in the data. It is demonstrated that change points may occur in the statistics of short durations which cannot be attributed to a modification of the measurement procedures.

Tobias Gehrmann

Benedikt Rothe
Hydrotec GmbH
Bachstraße 62-64
52066 Aachen
tobias.gehrmann@hydrotec.de
benedikt.rothe@hydrotec.de

Fabian Netzel

Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik (LWH)
Hochschule Bochum
Am Hochschulcampus 1
44801 Bochum
fabian.netzel@hs-bochum.de

Vera Schimetzek

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Leibnizstr. 10
45689 Recklinghausen
vera.schimetzek@lanuv.nrw.de

Prof. Dr. Ing. Markus Quirnbach

Hochschule Ruhr West
Duisburger Str. 100
45479 Mülheim an der Ruhr
markus.quirnbach@hs-ruhrwest.de

Literatur

- [1] Sevruk, B.: Point precipitation measurements: why are they not corrected? In: IAHS (Hrsg.): Water for the future: Hydrology in perspective 164 (1987), S. 477-486.
- [2] Vuerich, E.; Monesi, C.; Lanza, L. G.; Stagi, L.; Lanzinger, E.: WMO Inter-comparison of Rainfall Intensity Gauges, Instruments and Observing Methods (IOM). In: Report No. 99, WMO/TD No. 1 504 (2009) (www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/, Abruf 01.04.2021).
- [3] Hannak, L.; Brinckmann, S. (Hrsg.): Deutscher Wetterdienst): Parallelmessungen an deutschen Klimareferenzstationen - Schlussfolgerungen im Hinblick auf Homogenität und Messunsicherheiten. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes (2020), Nr. 253.
- [4] Richter, D.: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes (1095), Nr. 194.
- [5] Mudersbach, C.; Netzel, F.; Gehrmann, T.; Rothe, B.; Bender, J.: Untersuchungen zur Anwendung von instationären Bemessungsansätzen in der wasserwirtschaftlichen Praxis (UnIWA). Projektbericht für das LANUV NRW (2020).



Niederschlag Messreihen

Oberle, P.; Kron, A. et al.: Diskussionsbeitrag zur Fließwiderstandsparametrisierung zur Simulation der Oberflächenabflüsse bei Starkregen. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 4/2021. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. www.springerprofessional.de/link/19037446

Seibert, S. P.; Auerswald, K.: Abflussentstehung - wie aus Niederschlag Abfluss wird. In: Hochwassereminderung im ländlichen Raum. Wiesbaden: Springer Spektrum, 2020. www.springerprofessional.de/link/18328010