

Daniel Schwandt, Martin Helms, Gerd Hübner, Jörg Uwe Belz & Wilfried Wiechmann

Das extreme Niedrigwasser des Jahres 1921 in den großen Flüssen Deutschlands im Vergleich zum Niedrigwasser 2018

The extreme low flow of 1921 in the large German rivers in comparison with the low flow in 2018

Anhand des Vergleichs der Niedrigwasserjahre 1921 und 2018 wird exemplarisch aufgezeigt, welche Bedeutung die systematische Aufarbeitung und Auswertung historischer Niedrigwasserereignisse für das Verständnis, die Einordnung und Bewertung aktueller hydrologischer Dürren hat. Trockene Vorbedingungen aus dem Herbst 1920 sowie wiederholte längere Trockenphasen im Jahr 1921 resultierten in einer außergewöhnlich niedrigen Wasserführung der Fließgewässer mit Auswirkungen auf die Wasserbeschaffenheit, die Wasserversorgung und die Schifffahrt. Dieses extreme Niedrigwasser war an Rhein, Weser, Donau (vor dem Zufluss des Inns) und Oder von bemerkenswert langer Dauer, an der Elbe kürzer, aber ebenfalls stark ausgeprägt. Das Niedrigwasserjahr 2018 erreichte oder übertraf die umfassend extremen Verhältnisse des Jahres 1921 nur partiell, wozu auch die heute vorhandenen Talsperren beitrugen. Die fehlende Verdünnung von Abwassereinleitungen ließ in beiden Jahren Schwerpunkte der Gewässerbelastung hervortreten, wobei außergewöhnliche Konzentrationsspitzen gemessen wurden. Für die Untersuchung langer Trockenphasen bietet sich das Niedrigwasserjahr 1921 als Referenz zur Bewertung und statistischen Einordnung weiterer beobachteter oder simulierter Niedrigwasserextreme an.

Schlagwörter: Niedrigwasser, hydrologische Extreme, Niedrigwasserkenngößen, Wasserbeschaffenheit, historischer Vergleich

By comparing the low flow years 1921 and 2018, the importance of the systematic processing and evaluation of historical low flow events for the understanding, classification and assessment of current hydrological droughts is exemplarily demonstrated. Dry preconditions from the previous autumn as well as repeated longer periods of drought in 1921 resulted in unusually low streamflow in the rivers with impacts on water quality, water supply and shipping. This extreme low flow event had a remarkably long duration on the Rhine, Weser, Danube (upstream of the confluence with the Inn) and Oder, and somewhat shorter on the Elbe, but also severe. The low flow year 2018 only partially reached or exceeded the overall extreme dimensions of 1921, to which the nowadays existing dams also contributed. The lack of dilution of wastewater discharges aggravated focal points of pollution in both years, and extraordinary concentration peaks were measured. With regard to the investigation of persistent dry conditions, the low flow year 1921 is a suitable reference for the evaluation and statistical classification of other observed or simulated low flow extremes.

Keywords: Low flow, hydrological extremes, low flow indicators, water quality, historical comparison

1 Einleitung

Langzeitbetrachtungen extremer Dürren in Europa bzw. Deutschland (COOK et al., 2015; HANEL et al., 2018; ERFURT et al., 2019; GLASER & KAHLE, 2020; SCHRIER et al., 2021) ordnen die Dürre im Jahr 1921 nach betroffener Fläche und Schweregrad hinsichtlich Niederschlag, Bodenfeuchte und Abfluss bzw. nach verschiedenen Dürreindizes als europaweites hydroklimatisches Extremereignis oder Megadürre ein. Die Folgen der Dürre kulminierten in der Sowjetunion (Wolga-, Uralgebiet und Ukraine) in einer katastrophalen Hungersnot, die durch (Nach)Kriegs- und Revolutionswirren zusätzlich befördert wurde (MÜHLENS, 1923). Aus Südost-England (BROOKS & GLASSPOOLE, 1922) und Frankreich (BLANCHARD, 1922) wurden für das Jahr 1921 die bis dato geringsten Jahresniederschläge berichtet, z. B. für Oxford 60 %, für Greenwich 53 % und für Paris 48 % des langjährigen Mittelwerts ab 1815 bzw. 1811 (Paris). Mit der meteorologischen Dürre kam es zu extremen Niedrigwasserphasen in den Flüssen Mitteleuropas. Davon zeugt auch die Markierung "1921" auf dem "Hungerstein" von Děčín, Elbe (Abb. 1; ELLEDER et al., 2020).

Die nachfolgende Darstellung unterschiedlicher Aspekte des Niedrigwassers von 1921 soll verschiedene Blickrichtungen auf dieses Extremereignis vereinen. Über die übliche Betrachtung der hydrometeorologischen Situation und der Wasserführung

(GRUNOW, 1935; DUBAND et al., 2004) hinaus wird hier der Wasserbeschaffenheit analog zu HÜBNER & SCHWANDT (2018) sowie zur INFORMATIONSPLOTTFORM UNDINE (o. J.) mehr Raum gegeben. Ferner werden Auswirkungen auf die Wasserver-

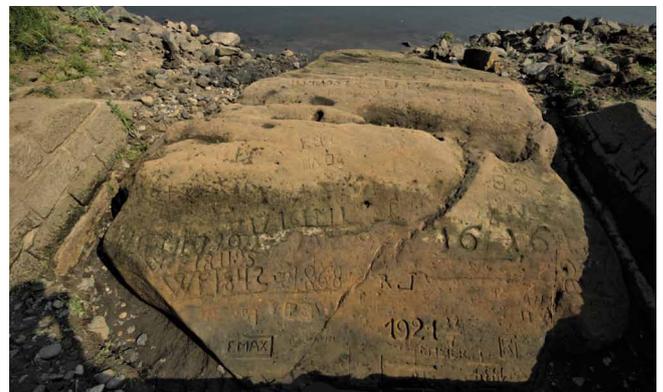


Abbildung 1
Hungerstein in Děčín, Elbe mit Niedrigwassermark 22. Juli 1921 (Foto: L. Elleder).
Hunger stone in Děčín, Elbe with low water mark 1921-7-22 (photo: L. Elleder).

sorgung und die Schifffahrt beleuchtet. Schwer zugängliche Daten zur Wasserbeschaffenheit im Jahr 1921 werden erstmalig veröffentlicht. Ein Vergleich erfolgt mit dem Niedrigwasser 2018, das ebenfalls in mehreren Flussgebieten Deutschlands ein längeres Extremereignis war. Entlang der Wirkungskette "Hydrometeorologie – Wasserführung – Wasserbeschaffenheit" werden Dauer und Intensität der Verhältnisse gegenübergestellt. Bezugszeitraum ist stets das Kalenderjahr. Gegebenenfalls schließt die Betrachtung über Deutschland hinaus auch Gewässerabschnitte benachbarter Länder ein.

2 Hydrometeorologische Situation und Wasserführung

2.1 Großwetterlagen

Mit der atmosphärischen Zirkulation und den daraus abgeleiteten 29 Großwetterlagen Europas (GWL) nach Hess & Brezowsky (WERNER & GERSTENGARBE, 2010) sind Luftmassenbewegungen bzw. -blockaden verbunden, wie z. B. die 1921 und 2018 besonders häufige Blockade der Zufuhr feuchter Atlantikluft durch eine Hochdruckbrücke (BM) oder ein Hoch (HM) über Mitteleuropa. Niederschlagsarme GWL dieser Jahre und ihre Gesamtdauern sind in Tabelle 1 dargestellt.

Bezogen auf Messstationen in Deutschland mit einer Höhenlage < 1.000 m ü. NN weisen nach WERNER & GERSTENGARBE (2010) die in Tabelle 1 aufgeführten GWL mittlere Tagessummen des Niederschlags von ca. 1 mm oder weniger auf. Die Gesamtzahl der Tage mit diesen niederschlagsarmen GWL lag im Jahr 1921 mit 216 Tagen weit höher als 2018 (130 Tage). Besonders auffällig war 1921 die hohe Anzahl an Tagen der GWL HM sowie HNa, HFa, SEa und NWa. Mit 24 Tagen (28. September bis 21. Oktober 1921) hatte die GWL HM die längste Andauer im 20. Jahrhundert (WERNER & GERSTENGARBE, 2010). Im Jahr 1921 gab es zudem längere zusammenhängende Zeiträume niederschlagsarmer GWL als 2018 (Abb. 2).

2.2 Lufttemperatur und Niederschlag

Eine deutschlandweite Auswertung zur Niederschlagsverteilung (GRUNOW, 1935) weist für Oktober und November 1920 großteils nur < 10 bis 25 % der mittleren Niederschlagshöhe (Reihe 1851/1920) aus. Von Februar bis Oktober 1921 fielen im Wesergebiet 50 bis 75 % der mittleren Niederschlagshöhe, im Oder-, Elbe- und Donaugebiet verbreitet 50 bis 75 % sowie 75 bis 100 %, am Rhein über weite Gebiete 25 bis 50 % sowie 50 bis 75 %. Für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland sind in Abbildung 3 die Jahressummen und in Abbildung 4 die monat-

Tabelle 1

Niederschlagsarme Großwetterlagen: Anzahl der Tage in den Jahren 1921 und 2018 (GWL-Daten: WERNER & GERSTENGARBE, 2010; DWD, 2018). *Atmospheric circulation patterns with low precipitation depths: number of days during 1921 and 2018 (data: WERNER & GERSTENGARBE, 2010; DWD, 2018).*

Niederschlagsarme Großwetterlagen	Abk.	1921 [Tage]	2018 [Tage]
Hochdruckbrücke Mitteleuropa	BM	41	38
Hoch über Mitteleuropa	HM	58	14
Hoch Nordmeer-Island, antizyklonal	HNa	19	3
Hoch Britische Inseln	HB	6	0
Hoch Fennoskandien, antizyklonal	HFa	23	10
Hoch Nordmeer-Fennoskandien, antizyklonal	HNFa	0	3
Südwestlage, antizyklonal	SWa	3	9
Südostlage, antizyklonal	SEa	15	6
Südlage, antizyklonal	Sa	10	14
Nordwestlage, antizyklonal	NWa	31	15
Nordostlage, antizyklonal	NEa	10	11
Nordlage, antizyklonal	Na	0	7
Summe		216	130

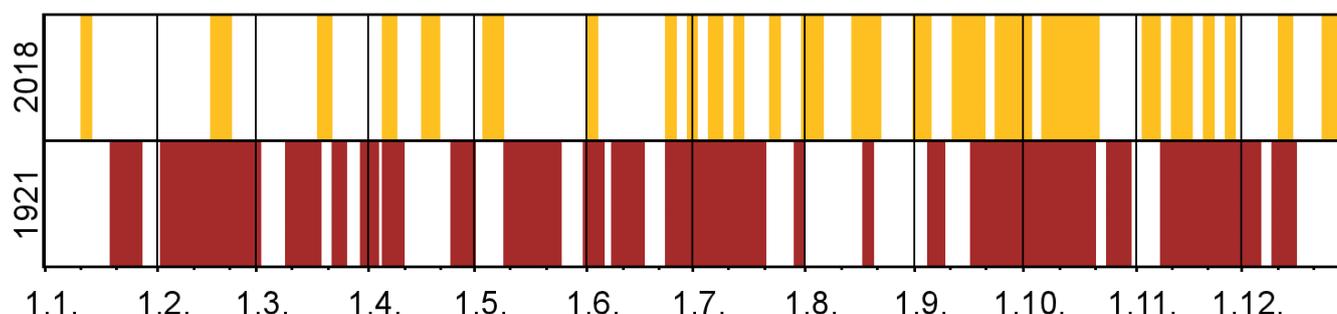


Abbildung 2

Abfolge niederschlagsarmer Großwetterlagen (Tab. 1) in den Jahren 1921 und 2018. *Sequence of large-scale weather patterns with low precipitation depths (tab. 1) in 1921 and 2018.*

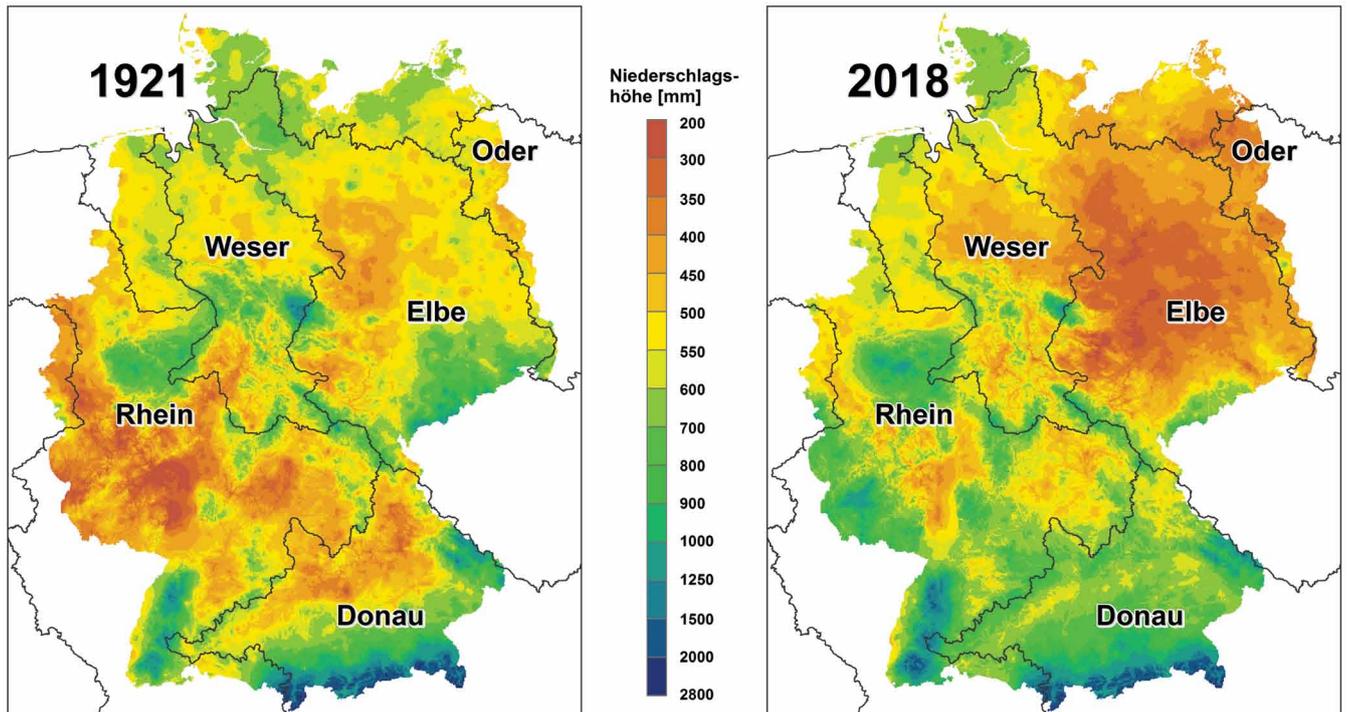


Abbildung 3

Jahressumme der monatlichen Niederschlagshöhe aus Rasterdaten von 1921 und 2018 für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Daten: DWD-CDC (2021).

Annual total 1921 and 2018 of the grids of the monthly precipitation depth for the area of the Federal Republic of Germany. Data: DWD-CDC (2021).

liche Verteilung der Niederschläge in den Jahren 1921 und 2018 dargestellt.

Die besondere Niederschlagsarmut im Rheingebiet im Jahr 1921 unterstreichen Jahressummen des Niederschlags (in Klammern Prozent des langjährigen Mittels) von 479 mm (62 %) in Kleve, 383 mm (57 %) in Trier und 246 mm (50 %) in Geisenheim (SASSENFELD, 1923). An den DWD-Messstationen Wiesbaden-Biebrich im Rheingebiet und Regengstau im Donaugebiet markiert das Jahr 1921 (Niederschlagsverlauf in Abb. 5) jeweils die mit Abstand niedrigste Jahresniederschlagssumme der gesamten ca. 120-jährigen Messreihen (DWD, 2020).

Abbildung 3 zeigt für das Jahr 1921 einen Streifen mit extrem niedrigem Jahresniederschlag vom Niederrhein bis ins Alpenvorland, während dieser im Jahr 2018 vorrangig östlich des Harzes vorkam. Die Jahressumme gibt jedoch keine Information über die zeitliche Verteilung der Niederschläge. Diese fielen im Januar und Dezember 2018 sowie auch in den Herbstmonaten 2017 reichlich, waren aber von Februar bis November 2018 – wie auch im Jahr 1921 – durchgehend gering (Abb. 4).

Bei einem Vergleich der deutschlandweiten Monatsmittel der Lufttemperaturen sind die hohen Werte im Frühjahr und Sommer 2018 hervorzuheben (Abb. 4), die die entsprechenden Werte von 1921 übertrafen. Die potenzielle Verdunstung dürfte damit 2018 höher als 1921 gewesen sein.

Einen Eindruck der extremen Witterung im Jahr 1921 nach damaliger Wahrnehmung vermittelt ein zeitgenössischer Bericht aus Basel (STRUB, 1923): "Als sehr warmes und außerordentlich tro-

ckenes Jahr trägt sich das Jahr 1921 in die Witterungsstatistik ein. Schon die drei letzten Monate des Jahres 1920, vor allem Oktober und November 1920, zeichneten sich durch außergewöhnliche Trockenheit aus. [...] Kein Jahr seit Beginn der Niederschlagsmessungen im Jahre 1864 war so trocken wie das Jahr 1921."

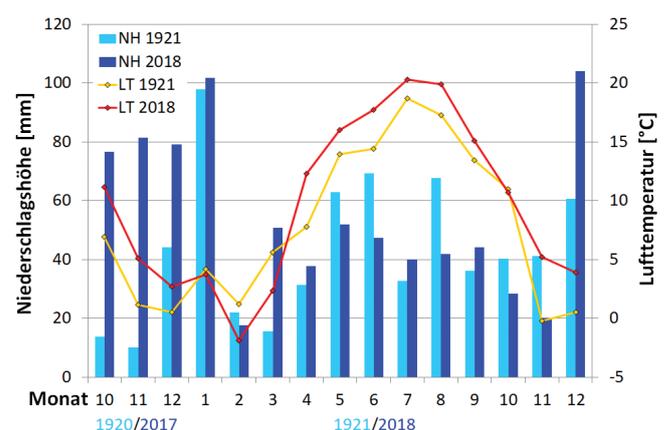


Abbildung 4

Mittlere monatliche Niederschlagshöhen (NH) und Lufttemperaturen (LT) in den Jahren 1921 und 2018 sowie in den vorangegangenen Herbstmonaten (Oktober bis Dezember) im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Daten: DWD-CDC (2022).

Mean monthly precipitation depths (NH) and air temperatures (LT) in the years 1921 and 2018 and the preceding autumn months (October to December) in the area of the Federal Republic of Germany. Data: DWD-CDC (2022).

Dort war der Januar 1921 der zweitwärmste der Messreihe Basel-Bernoullianum seit 1826, der Juli 1921 neben 1859 der wärmste und der Oktober 1921 schließlich der zweitwärmste. Vom 3. Februar bis 6. März 1921 (32 Tage) fiel kein messbarer Niederschlag, vom 9. Juli bis 10. August 1921 trat eine Hitzeperiode mit 21 heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30,0 \text{ °C}$) auf, vom 7. November bis 7. Dezember 1921 (31 Tage) gab es eine weitere Phase ohne Niederschlag.

2.3 Stauraum und Wasserbewirtschaftung

Niedrigwasserdurchflüsse können spürbar anthropogen beeinflusst sein. Hervorzuheben ist die Einrichtung und Bewirtschaftung von Talsperren, besonders solcher, die bestimmungsgemäß auch der Niedrigwasseraufhöhung dienen. Die Entwicklung dieser Stauraumkapazitäten ist für die Bewertung des Niedrigwasserjahres 1921 im Vergleich zur heutigen Situation (Niedrigwasserjahr 2018) ggf. zu berücksichtigen.

Im Wesergebiet dienen heute vor allem die Talsperren an Eder und Diemel sowie – zumindest in untergeordneter Funktion – auch die meisten Talsperren im Harz der Niedrigwasseraufhöhung (WSA HANN. MÜNDEN, 2014; HARZWASSERWERKE, 2020). Ihr Gesamtstauraum beträgt ca. 390 Mio. m³ (von 460 Mio. m³ Stauraum aller Talsperren im Weser-Einzugsgebiet gemäß LAWA, 1998). Die Edertalsperre mit dem bei weitem größten Stauraum (ca. 200 Mio. m³) ist seit 1914 in Betrieb. An der Oberweser (u. a. Pegel Hann. Münden) ist daher für 1921 bereits von einem zur Gegenwart annähernd vergleichbaren Talsperreneinfluss auszugehen.

Starken Einfluss haben heute die Talsperren im Elbegebiet. Der Gesamtstauraum größerer Speicher ($> 0,3 \text{ Mio. m}^3$) beträgt 4.120 Mio. m³, wobei ca. 2.400 Mio. m³ zumindest teilweise der Niedrigwasseraufhöhung dienen (IKSE, 2001, 2012). Hervorzuheben sind die Moldaukaskade (1.350 Mio. m³ Gesamtstauraum) sowie die Talsperre Nechanice (270 Mio. m³) an der Eger (Ohře), die seit den 1950/60er Jahren in Betrieb sind. Dagegen waren die 1921 vorhandenen Stauräume (ca. 220 Mio. m³) gering, was insbesondere bei der Bewertung der Niedrigwasserverhältnisse an den oberen deutschen Elbepegeln (z. B. Dresden) zu beachten ist.

Die Talsperren im Odergebiet (jeweils mit $> 5 \text{ Mio. m}^3$ Stauraum) haben heute einen Gesamtstauraum von ca. 1.100 Mio. m³ (ca. 640 Mio. m³ zumindest teilweise der Niedrigwasseraufhöhung dienend, IKSO, 2015). Im Jahr 1921 waren nach BACHMANN (1927) und POVODI LABE (2017) hingegen erst Talsperren mit insgesamt ca. 100 Mio. m³ Stauraum in Betrieb, überwiegend zum Hochwasserschutz oder Kraftwerksbetrieb. Im Jahr 1921 gab es an der Oder somit deutlich schwächere Talsperreneinflüsse auf Niedrigwasser als heute.

Im Rhein-Einzugsgebiet beträgt die Summe des bewirtschafteten Speichervolumens derzeit ca. 3.240 Mio. m³ (WILDENHAHN & KLAHOLZ, 1996; IKSR, 2018). Durch die Speicher in den Alpen (ca. 850 Mio. m³) wird im Sommer Wasser zurückgehalten, um es während der Niedrigwasserzeit im Winter zur Energieerzeugung wieder abzugeben. Winterliche Niedrigwasserdurchflüsse des Oberrheins (Pegel Basel) werden dadurch um 60 bis 120 m³/s erhöht (WEINGARTNER & PFISTER, 2007; BELZ et al., 2007; IKSR, 2018). Die weniger einheitliche Talsperrenbewirtschaftung im außeralpinen Bereich hat dagegen nur geringen Einfluss auf

die Niedrigwasserabflüsse des Rheins. Im Jahr 1921 gab es nennenswerte Stauräume nur in den Einzugsgebieten der Wupper (ca. 40 Mio. m³), der Ruhr (ca. 190 Mio. m³) sowie im Gebiet der Schweiz (ca. 55 Mio. m³) (BACHMANN, 1927; WILDENHAHN & KLAHOLZ, 1996), mit denen keine merkliche Niedrigwasseraufhöhung des Rheins bewirkt werden konnte.

Schließlich haben die im Donaugebiet oberhalb des Innzuflusses gelegenen Talsperren, die alle erst nach 1921 in Betrieb gingen, heute einen Gesamtstauraum von 375 Mio. m³ (LAWA, 1998), wovon 172 Mio. m³ (insbesondere 125 Mio. m³ im Sylvensteinspeicher) zur Niedrigwasseraufhöhung beitragen. Deutlich mehr Stauraum bewirtschaftbarer Speicher ist mit ca. 900 Mio. m³ gegenwärtig im Inn-Einzugsgebiet vorhanden (WOLF-SCHUMANN et al., 2013). Diese Speicher entstanden nach dem Jahr 1921, überwiegend in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Somit unterschied sich die Situation 1921 an der Donau von der heutigen, besonders unterhalb des Innzuflusses (Pegel Achleiten).

Zusammengefasst gab es im Jahr 1921 nur an der Weser bereits einen mit der Gegenwart vergleichbaren Einfluss einer größeren Talsperre auf die Niedrigwasserdurchflüsse. In den anderen großen Flussgebieten änderte sich die Situation in den folgenden Jahrzehnten durch den Bau zahlreicher Talsperren. Hervorzuheben ist der starke Einfluss der Moldaukaskade auf die Elbe.

2.4 Wasserführung und hydrologische Einordnung

Zur Analyse der Wasserführung der mitteleuropäischen Flüsse in den Jahren 1921, 2018 und weiteren Jahren wurden die täglichen Durchflüsse von je zwei wichtigen Pegeln ab dem Jahr 1901 untersucht (Datengrundlage WSV, 2021; Daten der Oderpegel erst ab November 1920). Infolge der warmen und trockenen Witterung ab Oktober 1920 kam es in den mitteleuropäischen Flussgebieten zu ausgeprägten und teils extremen Niedrigwasserphasen von jeweils mehreren Monaten Dauer. Auch wenn alle Flussgebiete betroffen waren, unterschieden sich die zeitlichen Abläufe. In Abbildung 5 werden für 1921 die Durchflussganglinien von je zwei Pegeln eines Flusses im Vergleich zum Jahr 2018 dargestellt. Ergänzend sind jeweils tägliche Niederschlagshöhen einer möglichst zentral gelegenen Wetterstation (DWD-CDC, 2020) enthalten. Zur Einordnung der Durchflussdynamik an den Pegeln dienen der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss bzw. -durchfluss (MNQ) und der mittlere jährliche Abfluss bzw. Durchfluss (MQ), jeweils im Zeitraum von 1961 bis 2020, dem Gesamtzeitraum der letzten beiden Klimareferenzperioden (Tab. 2).

Unterschiedliche Durchflussverhältnisse im Jahr 1921 sind zwischen den nördlichen Flussgebieten (Weser, Elbe, Oder) und den südlichen Flussgebieten des Rheins (Pegel Basel) und der Donau erkennbar. Am Rhein zeigt der Ganglinienvergleich für Basel und Köln als besonderes Phänomen, dass eine Abflussbildung im Zwischeneinzugsgebiet beider Pegel ab dem Spätwinter nahezu ausblieb, ergo die Wasserführung des Stroms von April bis November fast ausschließlich alpinen Ursprungs war.

In den nördlichen Flussgebieten ergaben sich bereits gegen Ende des Jahres 1920 Niedrigwasserlagen, die sich ostwärts abschwächten. Dabei wurde der MNQ an der Weser anhaltend unterschritten, während er an der Oder nur kurzzeitig oder annähernd erreicht wurde. In den folgenden Wintermonaten kam es in allen drei Flussgebieten wieder zu ansteigenden Durchflüssen (Abb. 5). An Elbe und Weser wurden dabei Durchflüsse bis

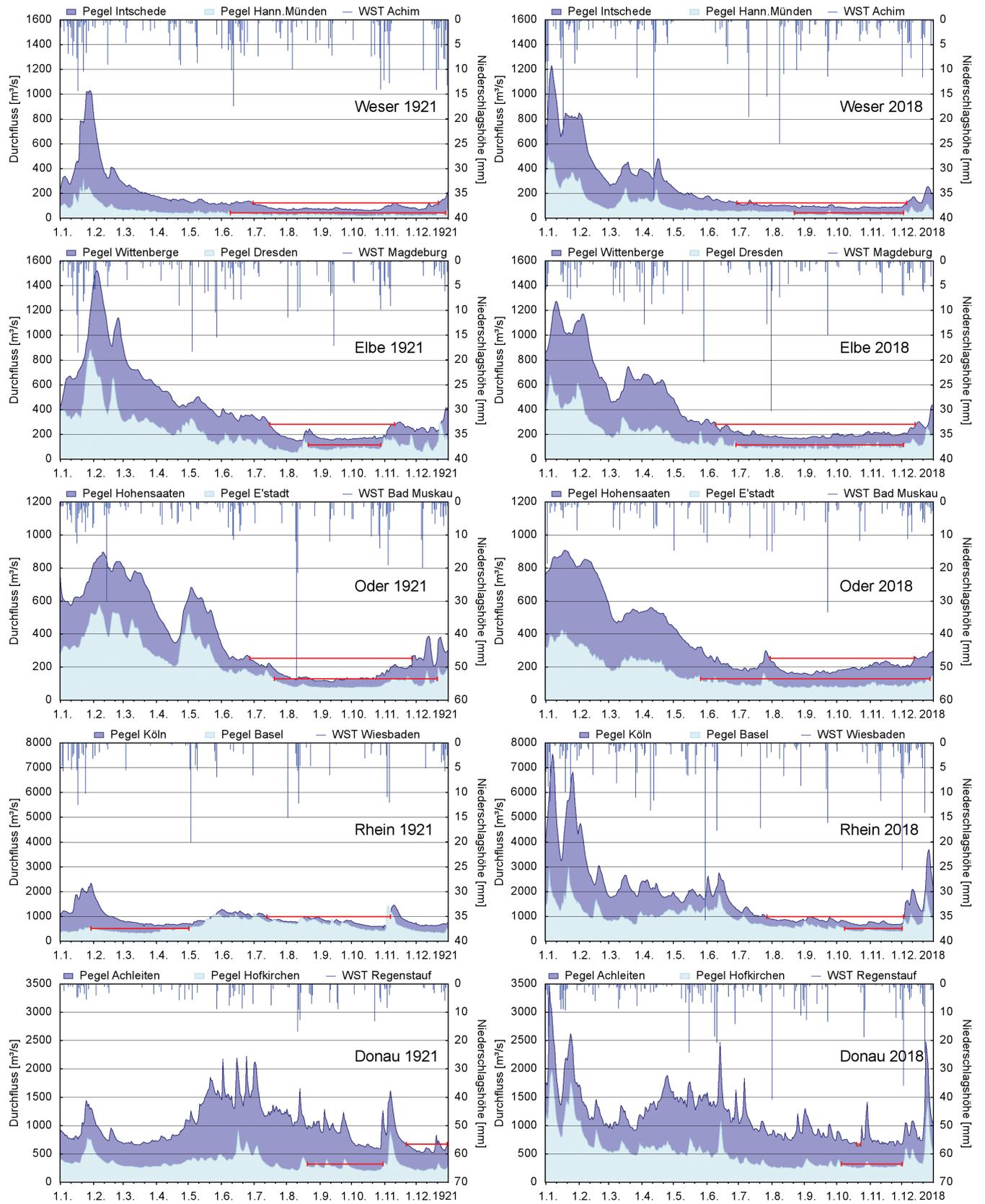


Abbildung 5

Tägliche Durchflussganglinien der Jahre 1921 und 2018 an je zwei Pegeln der betrachteten Flüsse mit maxD (max. ununterbrochene Unterschreitungsdauern im Jahr, siehe Text) als rote Linien auf MNQ-Niveau sowie Niederschlagshöhen ausgewählter Wetterstationen (WST).

Daily discharge hydrographs for the years 1921 and 2018 at each two selected gauges of the investigated rivers with maxD (maximum uninterrupted duration of undershoot during the year, see text) as red lines at the level of the mean annual minimum discharge as well as precipitation depths at selected weather stations (WST).

Tabelle 2

Ausgewählte Pegel mit Einzugsgebiet sowie mittlerem jährlichen Durchfluss (MQ) und mittlerem jährlichen Niedrigwasserdurchfluss (MNQ) im Zeitraum von 1961 bis 2020.

Selected gauges with catchment area, mean annual discharge (MQ) and mean annual minimum discharge (MNQ) of the period from 1961 to 2020.

Pegel	Gewässer	Einzugsgebiet [km ²]	MQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]
Hann. Münden	Weser	12.444	113	41,1
Intschede	Weser	37.720	314	121
Dresden	Elbe	53.096	320	114
Wittenberge	Elbe	123.532	679	279
Eisenhüttenstadt	Oder	52.033	294	129
Hohensaaten	Oder	109.567	515	252
Basel	Rhein	35.897	1.060	511
Köln	Rhein	144.232	2.140	982
Hofkirchen	Donau	47.496	636	315
Achleiten	Donau	76.660	1.400	668

zur zwei- bis dreifachen Höhe des MQ erreicht, an der Oder nur knapp 2MQ, jedoch folgte hier eine zweite Welle im April bzw. Mai. In der Folge kam es bei erneut anhaltend trockenen und sommerlichen Witterungsperioden zu mehr oder weniger kontinuierlichen Durchflussrückgängen (auf 50 bis 70 % des MNQ im August) sowie anschließend zu einem Verharren auf geringem Niveau bzw. an der Weser nur noch zu einem verlangsamten weiteren Durchflussrückgang. Erst gegen Ende des Jahres entspannten sich die Niedrigwasserlagen allmählich (Abb. 5), bevor es ab Januar 1922 zu deutlicheren Durchflussanstiegen kam. Damit zeigte das Jahr 1921 in diesen Flüssen einen im Grundsatz ähnlichen Verlauf wie 2018.

Im südlichen Teilgebiet des Rheins (bis Pegel Basel) und im Donauebiet war das Niedrigwasser im Herbst 1920 intensiver ausgeprägt mit einem Durchflussniveau zwischen 65 und 80 % des MNQ. Eine winterliche Erholung war nur schwach bzw. fand kaum statt (Pegel Basel, Abb. 5), sodass es im trockenen Spätwinter erneut Niedrigwasser gab. Die dabei erreichten Durchflüsse waren am Pegel Basel noch kleiner als im vorangehenden Herbst (ca. 60 % des MNQ). Etwas stärker gegenüber dem Herbst erholte sich die Donau, wo die Durchflüsse nur auf 80 % von MNQ (Pegel Hofkirchen) oder MNQ (Pegel Achleiten) zurückgingen. Im Frühjahr kam es an der Donau, besonders unterhalb des Innzuflusses, und am Rheinpegel Basel bis Anfang Juli trotz des sehr überwiegenden Auftretens von niederschlagsarmen GWL zu einem allmählichen Durchflussanstieg, offenbar maßgeblich durch glaziales und nivales Schmelzwasser. Gegen Ende dieses Anstiegs traten v. a. an der Donau (besonders in Achleiten) einzelne Durchflussspitzen auf, die auf kurze regional begrenzte Regenereignisse im Alpenraum zurückzuführen sind und keinen nachhaltigen Durchflussanstieg in Donau und Rhein bewirkten. Auch während des mit dem anhaltenden Auftreten niederschlagsarmer GWL ab Juli einsetzenden und sich bis zum Herbst fortsetzenden Durchflussrückgangs kam es an Rhein und Donau immer wieder zu kleineren Durchflussspitzen (v. a. Anfang November), die dem Rückgang zeitweise entgegenwirkten und ihn insgesamt abschwächten. Dennoch wurden im Herbst 1921 wieder ähnliche Niedrigwasserdurchflüsse wie im Frühjahr und im vorangegangenen Herbst erreicht (60 bis 80 % des MNQ).

Insbesondere wegen des Einflusses der südlichen Flussgebietsanteile unterschieden sich die Durchflussverhältnisse im

Niedrigwasserjahr 1921 an Rhein und Donau von denen des Jahres 2018, in dem nach feuchterem Frühjahr ein regelmäßiger Durchflussrückgang bis in den Herbst zu beobachten war. Im Jahr 1921 dagegen führten die anzunehmenden Beiträge glazialer und nivaler Komponenten alpiner Abflussregimes im späten Frühjahr bzw. Frühsommer zur Unterbrechung der Niedrigwasserphase. In einem wärmeren Klima dürfte sich der Einfluss dieser Komponenten abschwächen (STAHL et al., 2017).

Vor dem Hintergrund der teilweise unterschiedlichen Entwicklung des Niedrigwassers in den Jahren 1921 und 2018 boten sich am Rhein in beiden Jahren kuriose Bilder. So führten außergewöhnlich niedrige Wasserstände im Frühjahr 1921 dazu, dass die Burg Pfalzgrafenstein in der Flussmitte bei Kaub trockenen Fußes vom Ufer aus zu erreichen war (SASSENFELD, 1923). Ebenfalls am Mittelrhein, aber im Oktober 2018, war der Mäuseturm bei Bingen zu Fuß über trockengefallene Kies- und Schotterbänke begehbar (Abb. 6).



Abbildung 6

Spaziergang am 21. Oktober 2018 zum Binger Mäuseturm am Mittelrhein (Foto: K. Wendling).

Walk on Oct. 21, 2018 to the Mäuseturm of Bingen on the Middle Rhine river (photo: K. Wendling).

Um die Niedrigwasserjahre 1921 und 2018 langfristig einzuordnen, wurden Serien folgender Niedrigwasserkenngrößen gebildet, die sich auf die Kalenderjahre 1901 bis 2020 beziehen.

- NM7Q [m^3/s]: niedrigster über sieben Tage gemittelter Durchfluss pro Jahr.
- sumD [Tage]: Summe aller Unterschreitungsdauern des Schwellenwerts MNQ pro Jahr.
- maxD [Tage]: maximale ununterbrochene Unterschreitungsdauer von MNQ pro Jahr. Kurzzeitig unterbrochene Unterschreitungsphasen wurden durch ein Pooling mithilfe der Referenzgröße der gleitenden 10-tägigen Mittelwerte des Durchflusses vereinigt, sofern die gleitenden Mittelwerte während der gesamten Unterbrechung kleiner als MNQ blieben.

Zur bestmöglichen Gewährleistung der Unabhängigkeit der Kenngrößen bei über den Jahreswechsel hinausgehenden Niedrigwasserphasen gelten folgende Regeln: NM7Q-Werte werden für das betreffende Jahr beibehalten, wenn sie der niedrigste Wert dieser Phase sind oder von diesem durch einen Durchflussscheitel $> \text{MNQ}$ getrennt sind. Andernfalls werden sie durch den nächstgrößeren unabhängigen NM7Q-Kandidaten aus dem betreffenden Jahr ersetzt. Die Kenngröße maxD wurde ggf. dem Jahr mit dem größeren Daueranteil der Unterschreitungsphase zugeordnet. Die Kenngröße sumD resultiert nur aus Tagen im jeweiligen Kalenderjahr.

Ferner wurden Streudiagramme der Serien "NM7Q vs. maxD" (Abb. 7) und "NM7Q vs. sumD" (Abb. 8) jeweils für den Zeitraum 1901 bis 2020 erstellt, in denen die Jahre 1921 und 2018 (sowie weitere Jahre mit stark ausgeprägtem Niedrigwasser) bezeichnet sind. Mit Kreuzen markiert sind Jahre, in denen extreme Werte (v. a. NM7Q) vermutlich durch eisbedingten Rückstau im Gewässernetz beeinflusst wurden und daher gesondert zu bewerten sind. Diese Einstufung erfolgte nach Untersuchung der Durchflussganglinie und verfügbarer Temperaturdaten (KACHELMANNWETTER, 2021). An der Elbe und der Weser wurden auch unterschiedliche Einflüsse von Talsperren berücksichtigt, da sich stark veränderte Einflüsse (Inbetriebnahmen der Moldaukaskade und der Edertalsperre) zeitlich relativ gut abgrenzen ließen, während sie in den anderen Flussgebieten mit einer Vielzahl von Zwischenzuständen allmählicher hinzukamen (Kap. 2.3). Zu erwähnen sind schließlich Streueffekte beim Auftreten jahresübergreifender Niedrigwasserphasen, da die verschiedenen Kenngrößen bei den gewählten (oder auch alternativ denkbaren) Zuordnungsregeln nicht immer der gleichen Phase entstammen.

An der Weser ist mit der Inbetriebnahme der Edertalsperre im Jahr 1914 kein wesentlicher Effekt anhand des Streuverhaltens der Wertepaare in den Abbildungen 7 und 8 erkennbar, sodass das Jahr 1921 pauschal gegenüber dem Gesamtzeitraum ab 1901 eingeordnet wird. Dabei verdeutlichen die Streudiagramme die extreme Ausprägung des Jahres 1921 sowohl hinsichtlich der erreichten Niedrigwasserdurchflüsse (Rang 2 der NM7Q an den Pegeln Hann. Münden und Intschede) als auch hinsichtlich der Dauer unterhalb von MNQ (Rang 1 der sumD beider Pegel sowie der maxD von Hann. Münden, Rang 2 der maxD von Intschede). Eine herausragende Stellung, unter anderem im Vergleich zum

Jahr 2018, nehmen die Dauerkenngößen des Jahres 1921, insbesondere am Pegel Hann. Münden ein.

Gegenüber der Weser ist an der Elbe, besonders am Pegel Dresden, ein Einfluss der Talsperren in den Abbildungen 7 und 8 nachvollziehbar (unterschiedliche NM7Q bei ähnlichen Dauerkenngößen). Daher ist das Jahr 1921 den Serien 1901 bis 1964 (vor Fertigstellung der Moldaukaskade) zuzuordnen. In diesen Serien nimmt das Niedrigwasser 1921 an den Pegeln Dresden und Wittenberge für NM7Q die Ränge 5 und 6 ein (ohne eisbeeinflusstes Niedrigwasser 1954), für maxD jeweils den Rang 7. Bei sumD erreicht das Jahr 1921 aufgrund weiterer Unterschreitungstage im Zuge der nur allmählichen Erholung im Herbst Rang 5 in Dresden und Rang 3 in Wittenberge. Das Jahr 2018 rangiert bei sumD und maxD trotz stärkerem Talsperreneinfluss und besonders in Dresden höherem NM7Q noch vor dem Jahr 1921. Insgesamt war 1921 an der Elbe ein stark ausgeprägtes, jedoch kein ausgesprochen extremes Niedrigwasserjahr.

An der Oder traten 1921 extreme Niedrigwasserdurchflüsse auf. So liegt der NM7Q 1921 am Pegel Eisenhüttenstadt auf Rang 5 der kleinsten NM7Q von 1921 bis 2020 und ist am Pegel Hohensaaten der deutlich kleinste Wert (NM7Q 2018 jeweils Rang 6). Auch bei maxD (beide Pegel) und sumD (nur Hohensaaten) gehört 1921 zu den vier bis fünf Jahren mit den längsten Durchflussdauern unter MNQ. Somit zählt das Niedrigwasserjahr 1921 an der Oder, besonders am unteren Pegel Hohensaaten, zu den extremsten Jahren seit Beginn der Messreihe im Jahr 1920. Im Jahr 2018 traten am Pegel Hohensaaten ähnliche Dauern (sumD und maxD) wie 1921 auf, während die Dauern am Pegel Eisenhüttenstadt trotz heute stärkerem Talsperreneinfluss die längsten aller Jahre ab 1921 waren.

Am Rhein hatte der Verlauf des Niedrigwasserjahres 1921 eine andere Charakteristik als an Weser, Elbe und Oder, insbesondere durch die Unterbrechung der Niedrigwasserphase im Sommer. Trotzdem ergaben sich extreme Niedrigwasserdurchflüsse. So nimmt der NM7Q 1921 am Pegel Köln den zweiten und am Pegel Basel (ohne den eisbeeinflussten Wert von 1909) den ersten Rang ein. Auch die maxD 1921 liegen mit Rang 3 bzw. 2 weit vorne. Der weitaus extremste Charakter ergibt sich jedoch bei sumD, da die getrennten Unterschreitungsphasen hier addiert werden. Bei sumD übertrifft 1921 alle anderen Jahre sowohl in Basel als auch in Köln bei weitem. Ferner zu beachten ist die ausgeprägte Niedrigwasserphase im Herbst 1920. Im Vergleich zu 2018 fällt das Jahr 1921 in Basel für alle hier betrachteten Kenngrößen deutlich extremer aus, in Köln nur für sumD. Dabei hat das Jahr 2018 in Köln ebenfalls extreme Eigenschaften und belegt die Ränge 2 (maxD) bzw. 4 (sumD sowie NM7Q unter Ausschluss des eisbeeinflussten Jahres 1929). Am Pegel Basel gehört das Jahr 2018 keineswegs zu den am stärksten ausgeprägten Niedrigwasserjahren, wobei sich dies aufgrund der herbstlichen Niedrigwasserphase nicht durch den Einfluss der alpinen Speicherbewirtschaftung erklären lässt (Kap. 2.3).

Am Donauegel Hofkirchen ergibt sich langfristig eine ähnliche Einordnung des Niedrigwasserjahres 1921 wie am Rheinpegel Basel. So nimmt es sowohl in der NM7Q- als auch (sehr deutlich) in der sumD-Serie jeweils den ersten Rang ein, wobei für NM7Q die eisbeeinflussten Jahre 1929 und 1909 ausgeschlossen werden. Durch die Unterbrechung der Niedrigwasserphase im Frühjahr und zu Beginn des Sommers nimmt maxD nur den vierten

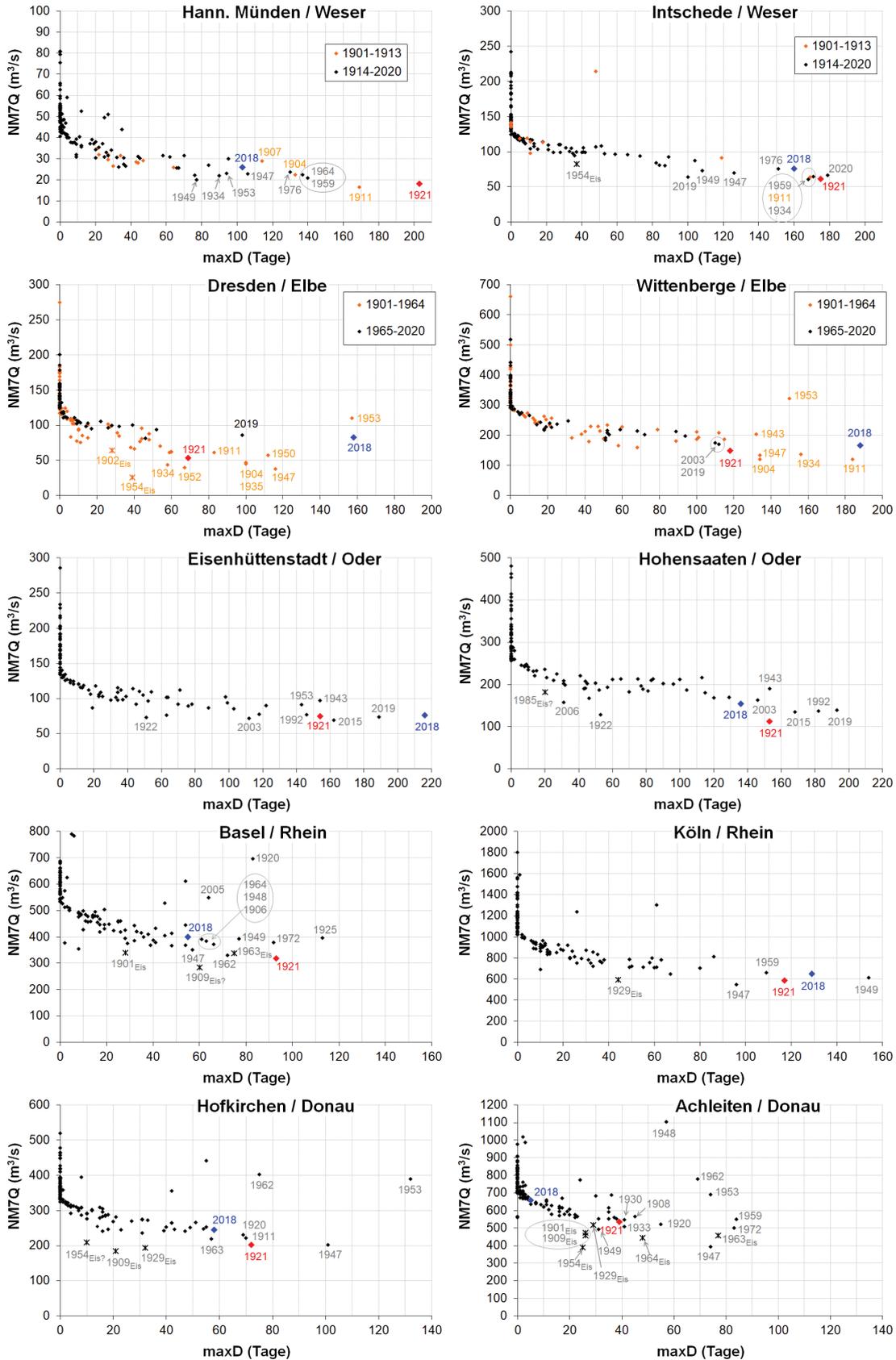


Abbildung 7

Niedrigwasserkenngrößen NM7Q vs. maxD (s. Text) der Jahre 1901 bis 2020 für die genannten Pegel und Flüsse. Jahre mit extremen Ausprägungen sind gekennzeichnet, bei vermutlichem Eiseinfluss durch ein Kreuz.

Low-flow indices NM7Q vs. maxD in the period 1901-2020 for the mentioned gauges and rivers. Years with extreme values are marked, in cases of a likely ice influence by a cross.

Rang ein. Insgesamt war das Jahr 1921 in Hofkirchen deutlich extremer als das Jahr 2018, das nur bei sumD den vierten Rang und bei NM7Q und maxD keinen vorderen Rang belegt. Zu diesem Unterschied zwischen 1921 und 2018 trugen die heute vorhandenen Talsperren bei, jedoch gegenüber dem Einfluss der über viele Monate trockenen Witterung im Jahr 1921 nicht in entscheidendem Maße (Kap. 2.3; BLFU, 2021). Weniger extrem ist die Einordnung des Jahres 1921 am Pegel Achleiten. Hier ergaben sich Ränge zwischen 7 (NM7Q, eisbeeinflusste Werte ausgeschlossen) und 13 (maxD). Die Gründe liegen in der v. a. durch den Innzufluss bedingten Unterbrechung der Niedrigwasserphasen (Abb. 5). Andererseits ist für beide Donauegel zu erwähnen, dass sich auch Ende 1920 eine ausgeprägte Niedrigwasserphase ereignete. Das Jahr 2018 war am Pegel Achleiten hingegen unauffällig.

Die Abbildungen 7 und 8 verdeutlichen, dass in den Jahren 1921 und 2018 jeweils alle (fünf) großen deutschen Flussgebiete von extremen Niedrigwasserlagen betroffen waren. Es zeigt sich zudem, dass auch in anderen Jahren extreme, über mehrere Flussgebiete ausgedehnte Niedrigwasserlagen auftraten. Hervorzuheben sind die Niedrigwasserjahre 1911, 1934, 1949 und 1959 mit jeweils drei sowie insbesondere das Niedrigwasserjahr 1947 mit vier betroffenen Flussgebieten. Bekannte Niedrigwasserjahre aus der jüngeren Vergangenheit (2003, 2015, 2019) waren räumlich weniger stark ausgeprägt.

3 Wasserbeschaffenheit

3.1 Wassertemperatur

Nach FORSTER (1894) spiegelt im Großen und Ganzen der jährliche Gang der Temperatur eines fließenden Gewässers den Gang der Lufttemperatur wider. Der Tagesgang der Wassertemperatur in Flüssen liegt aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wassers meist innerhalb der täglichen Schwankung der Lufttemperatur (Eistage ausgenommen). Hohe Wassertemperaturen sind daher in Mitteleuropa in den Monaten Juni, Juli und August erwartbar. Niedrigwasser begünstigt die Erwärmung des Wassers, ist jedoch nicht der bestimmende Einflussfaktor (SCHWANDT et al., 2019). Die Gleichzeitigkeit von Niedrigwasserverhältnissen und den

höchsten Wassertemperaturen wird nachfolgend für die Jahre 1921 und 2018 an Messstellen von Rhein, Donau und Elbe geprüft (Tab. 3). Für Weser und Oder lagen keine vergleichbaren Datensätze vor. Es ist zu berücksichtigen, dass die Wassertemperatur auch durch Einleitung von Abwasser, insbesondere von Kühlwasser thermischer Kraftwerke sowie durch flussbauliche Maßnahmen wie den Bau von Staustufen, erheblich beeinflusst wird (WEBB & NOBILIS, 1995; ZAVARSKY & DÜSTER, 2020).

Die Aufgabe von Messstellen bzw. die Beendigung der Publikation von Messdaten bedingten bei der Zusammenstellung in Tabelle 3 in einigen Fällen die Nutzung nahegelegener Messstellen:

- Karlsruhe/Maxau: 1921 am Pegel Maxau (Rhein-km 362,3) (LFG, 1943; BWS, 1933), 2018 an der Gütemessstation Karlsruhe (Rhein-km 359,2) (LUBW, 2020)
- Düsseldorf: 1921 am Wasserwerk Düsseldorf-Flehe (Rhein-km 731,4) werktäglich, 2018 Messboje am Kraftwerk Düsseldorf-Lausward (Rhein-km 739,5) (STADTWERKE DÜSSELDORF, 1921, 2021)
- Lobith: 1921 am Pegel Lobith (Rhein-km 862,2), 2018 an der Messstelle Lobith Haven (Rhein-km 863,9) (RIJKSWATERSTAAT, 2020)
- Linz: 1921 und 2018 am Pegel Linz (Donau-km 2135,2) (VIA DONAU, 2020)
- Dresden: 1921 am Wasserwerk Saloppe (Elbe-km 51,9 rechtes Ufer) (STADT DRESDEN, 1922), 2018 am Pegel Dresden (Elbe-km 55,6 linkes Ufer) (WSV, 2021).

Für 2018 wurde aus den vorliegenden kontinuierlichen Messungen der Messwert zur korrespondierenden Messzeit im Jahr 1921 herangezogen.

An allen betrachteten Messstellen waren der höchste Tageswert und das größte Monatsmittel der Wassertemperatur im Jahr 2018

Tabelle 3
 Maximale Wassertemperaturen (Tageswerte/Monatsmittel) in Grad Celsius für die Jahre 1921 und 2018 in Rhein, Donau und Elbe an ausgewählten Messstellen (HT = Tageswert zur Messzeit, MT = Monatsmittel aus Tageswerten; Quellenangaben siehe Text).
Maximum water temperature (scheduled measurements/monthly mean) in degrees Celsius for 1921 and 2018 in Rhine, Danube and Elbe on selected measuring points (HT = daily value at scheduled time, MT = monthly mean from daily values; references see text).

Fluss	Messstelle		1921	Messzeit	2018	Messzeit
Rhein	Karlsruhe/Maxau	HT	23,5 (Juli öfter)	7 – 8 Uhr	26,3 (08.08./09.08.)	7 Uhr
		MT	20,5 (Juli)		24,7 (August)	
	Düsseldorf	HT	25,0 (29.07.)	?	26,8 (04.08.)	9 Uhr
		MT	21,9 (Juli)		24,2 (Juli)	
	Lobith	HT	23,8 (29.07.)	8 Uhr	26,2 (28.07.)	8 Uhr
		MT	21,1 (Juli)		23,7 (Juli)	
Donau	Linz	HT	19,5 (29.07.)	10 Uhr	23,1 (08.08.)	10 Uhr
		MT	17,6 (Juli)		20,8 (August)	
Elbe	Dresden	HT	23,9 (August)	6 Uhr	26,9 (02.08.)	6 Uhr
		MT	19,7 (August)		23,2 (August)	

*) keine Angabe; Vermutung anhand der angegebenen Lufttemperatur: ca. 9 Uhr

höher als 1921. Dies wird vor allem den 2018 gegenüber 1921 höheren Lufttemperaturen (Abb. 4) und insbesondere am Rhein auch höheren Kühlwassereinleitungen (ZAVARSKY & DÜSTER, 2020) zugeschrieben.

Am Rhein in Karlsruhe-Maxau, Düsseldorf und Lobith wies der Juli 1921 das höchste Monatsmittel und den Tag mit der höchsten Wassertemperatur zur Messzeit auf. Im Jahr 2018 war es in Lobith wiederum der Juli, jedoch der August an der Gütemessstation Karlsruhe. In Düsseldorf lag 2018 der Tag mit der höchsten Wassertemperatur im August, jedoch hatte der Juli 2018 das höchste Monatsmittel der Wassertemperatur. Die hohen Wassertemperaturen waren zwar bei niedriger Wasserführung, jedoch nicht in den Phasen extrem niedriger Durchflüsse (Abb. 5) zu beobachten.

Auch am Pegel Linz an der österreichischen Donau traten der Tag mit der höchsten Wassertemperatur und das höchste Monatsmittel im Juli 1921 bzw. im August 2018 nicht gleichzeitig mit der niedrigsten Wasserführung (typischerweise im Spätherbst und Winter) auf.

An der Elbe in Dresden lagen 1921 sowohl der Tag mit der höchsten Wassertemperatur, das höchste Monatsmittel der Wassertemperatur als auch die niedrigste Wasserführung des Jahres im August. Im Jahr 2018 wurden der Tag mit der höchsten Wassertemperatur und das höchste Monatsmittel wiederum bei sehr niedriger Wasserführung im August registriert (HÜBNER & SCHWANDT, 2020b), das NM7Q aber im September. Gegenüber dem Zustand im Jahr 1921 ist für das Jahr 2018 unter anderem der in den 1930er Jahren erfolgte weitere Ausbau von Stau-stufen im tschechischen Abschnitt der Elbe (IKSE, 2005) als erwärmungsfördernd zu betrachten.

Ein Abflussregime mit sommerlichen nivalen und glazialen Schmelzwasserbeiträgen aus (alpinen) Hochlagen verhinderte an den betrachteten Messstellen an Rhein und Donau das Zusammentreffen von Niedrigwasser und hohen Wassertemperaturen. Die Elbe mit lediglich Mittelgebirgen im Einzugsgebiet führt dagegen häufiger schon ab Juli Niedrigwasser bei gleichzeitig hohen Wassertemperaturen.

3.2 Wasseranalysen und Belastungssituation

Die Wasserbeschaffenheit ist in Niedrigwasserphasen generell durch weniger Verdünnungswasser und eine Aufkonzentration löslicher Substanzen geprägt. Dadurch wird die stoffliche Belastungssituation aus geogenem Hintergrund und anthropogenen Einträgen erhöht, sofern letztere unverändert bleiben.

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde eine überschaubare Kenngrößenzahl zur Charakterisierung der Wasserbelastung durch Salze (vor allem Natriumchlorid), Härtebildner (Calcium und Magnesium), leicht abbaubare organische Substanz (Kaliumpermanganatverbrauch [KPMV]) sowie durch Sauerstoffmangel (Sauerstoffgehalt) untersucht, flankiert von summarischen Kenngrößen wie Abdampfdruckstand und Glühverlust. Ein Teil dieser Kenngrößen wird im Rahmen des Gewässergütemonitorings auch heute noch gemessen und hier für vergleichende Betrachtungen genutzt. Zur Donau konnten für das Jahr 1921 keine Messreihen chemischer Kenngrößen recherchiert werden.

3.2.1 Rhein

Im Wasserwerk Düsseldorf-Flehe erfolgten 1921 wöchentliche Analysen der Wasserhärte und des KPMVs sowie alle drei Monate eine umfangreiche chemische Analyse des Rheinwassers (zusätzlich u. a. Calcium-, Magnesium- und Chloridkonzentration) (STADTWERKE DÜSSELDORF, 1921). Das Monitoring der Rheinmessstelle Düsseldorf-Flehe, u. a. zu Chlorid und Härte, erfolgte im Jahr 2018 in annähernd monatlichem Turnus (LAND NRW, 2021). Für Härte und Chlorid zeigt sich 1921 ein weitgehend inverser Zusammenhang zur Wasserführung (Abb. 9). Dieser ist auch im Sommer und Herbst 2018 für Chlorid deutlich ausgeprägt, bei der Härte jedoch nicht vorhanden. Das allgemeine Konzentrationsniveau von Chlorid lag 2018 höher als 1921. Der in STADTWERKE DÜSSELDORF (1921) ausgewiesene erhöhte KPMV in den Niedrigwasserphasen 1921 deutet auf eine erhebliche Belastung des Rheins mit sauerstoffzehrender, leicht abbaubarer organischer Substanz hin.

Mit der Erlaubnis zur Einleitung geklärter Abwässer in den Rhein wurde die Stadt Mannheim zu regelmäßigen Rheinwasseruntersuchungen von Mannheim bis Worms verpflichtet, die ab 1907 durch das Städtische Untersuchungsamt ausgeführt wurden (CANTZLER & SPLITTGERBER, 1916). Im Jahr 1921 fanden am 12. April und am 25. Oktober Probenahmen an insgesamt zwölf Entnahmestellen statt. Beide Termine fallen in ausgeprägte Niedrigwasserphasen, daher werden ausgewählte Ergebnisse bei Mannheim-Ludwigshafen und Worms aufgeführt (Tab. 4). Zwischen diesen beiden Messstellen erfolgten diverse Abwässereinleitungen (städtische Abwässer Ludwigshafen, Abwasser BASF, Mannheimer Kläranlage, Zellstofffabrik Waldhof) und der Zufluss des Neckars, der im Oktober 1921 ebenfalls extremes Niedrigwasser führte. Der Sauerstoffgehalt lag an allen zwölf

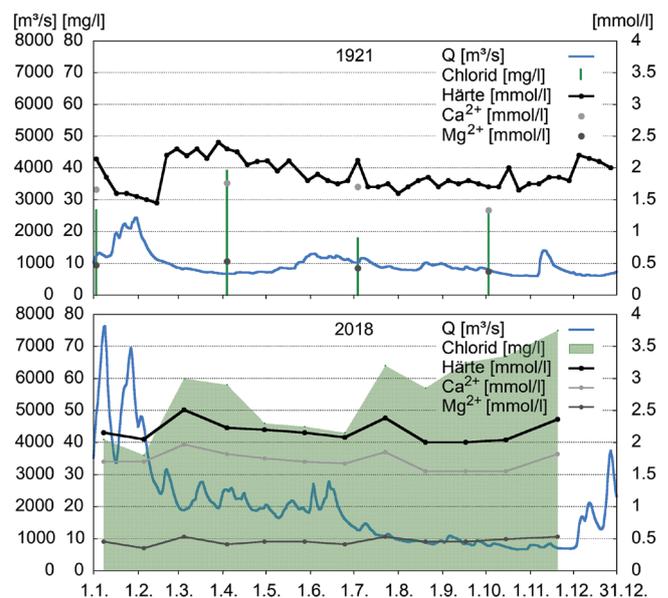


Abbildung 9

Chloridkonzentration und Wasserhärte des Rheins in Düsseldorf im Jahr 1921 (STADTWERKE DÜSSELDORF, 1921) und 2018 (LAND NRW, 2021) sowie Durchfluss am Pegel Düsseldorf. Chloride concentration and water hardness of the Rhine in Düsseldorf during 1921 (STADTWERKE DÜSSELDORF, 1921) and 2018 (LAND NRW, 2021) as well as discharge at the Düsseldorf gauge.

Tabelle 4

Untersuchungsergebnisse des Rheinwassers (Flussmitte) auf der Strecke von Mannheim bis Worms (STADT MANNHEIM, 1922).
Analytical results of water from the Rhine (midstream) on the route from Mannheim to Worms (STADT MANNHEIM, 1922).

12.04.1921	Härte °dH [mmol/l]	Glühverlust mg/l	Chlorid mg/l	Kaliumpermanganatverbrauch mg/l
Oberhalb Rheinbrücke Ludwigshafen-Mannheim	9,8 [1,75]	46,4	11,5	22,7
Wasserentnahmestelle Worms	14,3 [2,55]	60,4	12,0	20,4
25.10.1921				
Oberhalb Rheinbrücke Ludwigshafen-Mannheim	9,0 [1,60]	45,0	10,0	13,2
Wasserentnahmestelle Worms	10,6 [1,89]	34,0	18,0	15,3

Messstellen oberhalb kritischer Werte. Die Zunahme der Härte und der Chloridkonzentration auf der Fließstrecke war sicherlich in erster Linie eine Folge der unmittelbaren Abwassereinleitungen in den Rhein. Der hohe Glühverlust am 12. April 1921 weist in Kombination mit dem KPMV auf eine Belastung durch leicht abbaubare organische Substanz hin.

3.2.2 Weser

Bei extrem niedriger Wasserführung im Sommer/Herbst 1921 kam es im Wesergebiet zu einem deutlichen Anstieg der Gewässerbelastung durch Einleitung salziger und harter Abwässer der Kali-Industrie. Die durchschnittliche Chloridkonzentration der Weser bei Hoya stieg von 266 mg/l im Juli 1921 auf 411 mg/l im Dezember. Der Mittelwert der Wasserhärte betrug dort im Juli 2,96 mmol/l (16,6 °dH) und im Dezember 4,12 mmol/l (23,1°dH). (AU HILDESHEIM, 1922). Aus den von Bremen initiierten Untersuchungen zum Schutz des aus der Weser entnommenen

Trinkwassers (TJADEN, 1922) wurden im Oktober 1921 an der Messstelle Dörverden (wenige Kilometer stromab von Hoya) für Chlorid und Härte in Spannweite und Mittelwert gut mit den vorgenannten Werten übereinstimmende Messergebnisse erzielt.

Trotz des verdünnenden Einflusses der Fulda und weiterer Weserzuflüsse wurden die vom Reichsgesundheitsrat festgelegten Grenzwerte für die Weser bei Dörverden (Chlorid: 171 mg/l; Härte: 16 °dH [2,85 mmol/l]) von Juli (Chlorid) bzw. von Mitte September (Härte) bis Ende Dezember 1921 dauerhaft überschritten (Abb. 10). Im ganzen Jahr 1921 traten Grenzwertüberschreitungen an 245 (Chlorid) bzw. 180 Tagen (Härte) auf (AU HILDESHEIM, 1922). An der Werra wurden die vom Reichsgesundheitsrat gesetzten Grenzen "in geradezu unerträglicher Weise überschritten" (TJADEN, 1922). Die höchste 1921 (Dezember) in der Werra in Hann. Münden gemessene Chloridkonzentration lag beim Fünffachen des Grenzwerts, bei der Härte wurde der Grenzwert um das Zweifache überschritten (BARCH, o. J.). Die leichte Erholung der Wasserführung Anfang und Ende Dezember 1921 wurde offensichtlich für die vermehrte Ableitung von Kaliabwässern genutzt und brachte Chlorid- und Härtespitzen in Werra und Weser. Die vom NLWKN (2021) in monatlichen Stichproben gemessenen Werte des Jahres 2018 in Abbildung 10 können hinsichtlich der Konzentrationsspitzen nicht mit den täglichen Werten von 1921 verglichen werden. Das Belastungsniveau mit Härtebildnern entsprach jedoch 2018 fast ganzjährig dem Niedrigwasserniveau von 1921. Bei Chlorid führte fehlendes Verdünnungswasser von September bis Dezember 2018 zu steigenden Konzentrationen. Das allgemeine Belastungsniveau der Weser ist auch für Chlorid im Jahr 2018 eher höher als niedriger als im Jahr 1921.

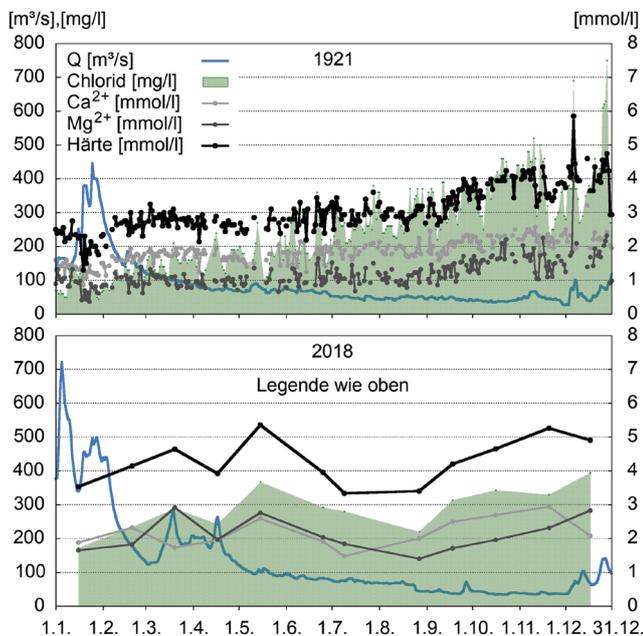


Abbildung 10

Chloridkonzentration und Wasserhärte der Weser im Jahr 1921 (Hoya, BARCH, o.J.) und 2018 (Drakenburg, NLWKN, 2021) sowie Durchfluss am Pegel Vlotho.
Chloride concentration and water hardness of the Weser during 1921 (Hoya, BARCH, without year) and 2018 (Drakenburg, NLWKN, 2021) as well as discharge at the Vlotho gauge.

3.2.3 Elbe

Im Dresdner Wasserwerk Saloppe fand jedes Quartal eine umfangreiche Analyse des Elbewassers statt, jedoch nicht im August 1921 zur Zeit der niedrigsten Wasserführung. Die Analyse vom 26. September 1921 weist einen unkritischen Sauerstoffgehalt von 9,2 mg/l aus, bei einem relativ hohen Abdampfückstand von 264,4 mg/l und einem KPMV von 27,9 mg/l (DREWAG, 1921). Der hohe Abdampfückstand resultierte sicherlich auch aus Abwassereinleitungen der Cellulose-, Papier- und chemischen Fabriken in Pirna und Heidenau, wenige Kilometer oberhalb von Dresden. Eine dortige Elbe-Bereisung am 5. August 1921 durch die Landesstelle für öffentliche Gesundheitspflege hinterließ folgenden Eindruck: "Die Elbe bot an dieser Stelle zur Zeit der Besichtigung einen sehr unerfreulichen Eindruck, infolge des niederen Wasserstandes lagen viele Einflußrohre der Fabrikwasseranlagen frei und verschmutzten die Elbe in wesentlichem Maße. [...] Das ein-

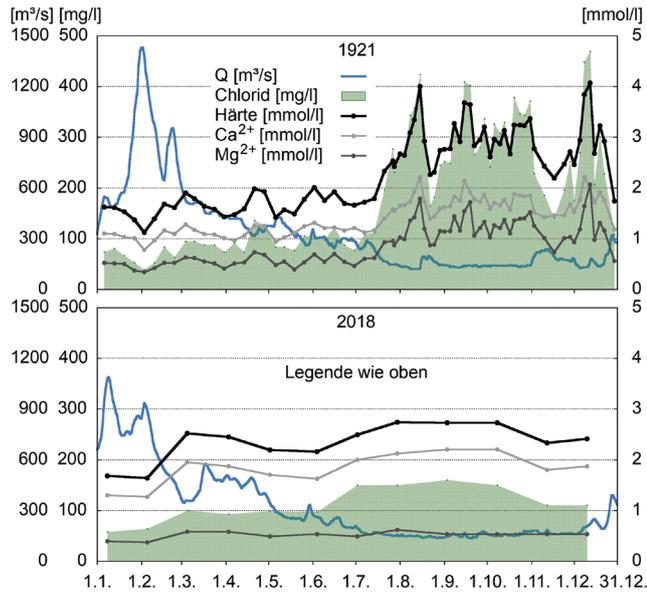


Abbildung 11
Chloridkonzentration und Wasserhärte der Elbe in Magdeburg, rechtes Ufer im Jahr 1921 (STADT MAGDEBURG, 1921,1922) und 2018 (LHW SACHSEN-ANHALT, 2020) sowie Durchfluss am Pegel Magdeburg-Strombrücke.
Chloride concentration and water hardness of the Elbe in Magdeburg, right river bank during 1921 (STADT MAGDEBURG, 1921,1922) and 2018 (LHW SACHSEN-ANHALT, 2020) as well as discharge at the Magdeburg-Strombrücke gauge.

fließende Abwasser erzeugte einen starken Schaum und es war ein ungefähr 8 m breiter Schaumstreifen entstanden, der sich kilometerweit am Ufer entlang zog." (HSTA, o. J.).

Da das Wasserwerk Magdeburg-Buckau Wasser direkt aus der Elbe am rechten Ufer entnahm, war die Untersuchungsfrequenz der chemischen Analysen recht hoch (bis zu neun Proben pro Monat für 1921 – STADT MAGDEBURG, 1921/1922). Im Jahr 2018 erfolgten durch das Land Sachsen-Anhalt monatliche Probenahmen am rechten Ufer der Elbe in Magdeburg (LHW SACHSEN-ANHALT, 2020).

Während der extremen Niedrigwasserphase im Sommer bzw. Herbst 1921 kam es vor allem durch die Abwässer der Kali- und Steinsalzindustrie im Saalegebiet zu einer starken Zunahme der Konzentration von Chlorid und Härtebildnern der Elbe in Magdeburg. Im Jahr 2018 war dieser Konzentrationsanstieg deutlich geringer und erreichte außer bei Calcium nicht das Konzentrationsniveau von 1921 (Abb. 11). Dies ist sicherlich auch der nach 1990 erfolgten Stilllegung von Kaliwerken zuzuschreiben. Gleichwohl war das Chlorid- und Härteniveau 2018 insgesamt noch recht hoch. Der linksseitige Zufluss der Saale oberhalb von Magdeburg bewirkt bekanntermaßen für Chlorid und Härte einen erheblichen Konzentrationsgradienten zwischen dem linken und rechten Ufer. Im Jahr 2018 wurden an der Messstelle Magdeburg links mit bis zu 520 mg/l Chlorid und 6,5 mmol/l Härte weit höhere Werte als am rechten Ufer gemessen (LHW SACHSEN-ANHALT, 2020; HÜBNER & SCHWANDT, 2020a/b).

Von Ende Juli bis Weihnachten 1921 wurden am rechten Ufer in Magdeburg extrem hohe Werte für Abdampfdruckstand (bis

1.150 mg/l), Glühverlust (bis 175 mg/l) und KPMV (bis 52 mg/l) registriert, die mit der Zuckerrübenkampagne und entsprechend starken Einleitungen leicht abbaubarer organischer Substanz zeitlich gut übereinstimmen. Demgegenüber wurden dort 2018 maximal 55 mg/l abfiltrierbare Stoffe, organische Kohlenstoffgesamtgehalte (TOC) bis zu 9,3 mg/l sowie minimale Sauerstoffgehalte von 8,4 mg/l gemessen (LHW SACHSEN-ANHALT, 2020) – was auf weit geringere Konzentrationen leicht abbaubarer organischer Substanz als 1921 hinweist.

3.2.4 Oder

Analysen zur Wasserbeschaffenheit während des Niedrigwassers 1921 sind für die Oder in Wroclaw (Breslau) dokumentiert (LÜHRIG, 1924). Die Stadt Breslau hatte ein besonderes Interesse an der Reinhaltung des Oderwassers, da sie einen großen Teil ihres Trinkwassers aus Uferfiltration entlang des linken Oderufers bezog. In Abbildung 12 sind für das Jahr 1921 der Verlauf der mittleren monatlichen Chloridkonzentration, die Spannweite täglicher Chloridwerte sowie die Wasserführung (hilfsweise am Pegel Eisenhüttenstadt) dargestellt. Die mittlere Chloridkonzentration der Oder stieg von Mai bis September 1921 mit abnehmender Wasserführung stark an. Die höchsten Chlorid-Monatsmittelwerte traten jedoch im Oktober und November bei bereits wieder zunehmender Wasserführung auf. Höchstwerte von 200 mg/l Chlorid und darüber wurden von 1907 (Beginn der täglichen Messungen) bis 1924 in keinem anderen Jahr erreicht. Auch der Jahresdurchschnitt der Chlorid-Konzentration 1921 übertraf mit 100 mg/l alle anderen Jahre im vorgenannten Zeitraum (LÜHRIG, 1924).

Ergebnisse für weitere Kenngrößen liegen für 1921 nur als einzelne Stichproben vor. Die Proben vom 28. Oktober bzw. 5. November 1921 zeigen – gegenüber sonstigen Ergebnissen im

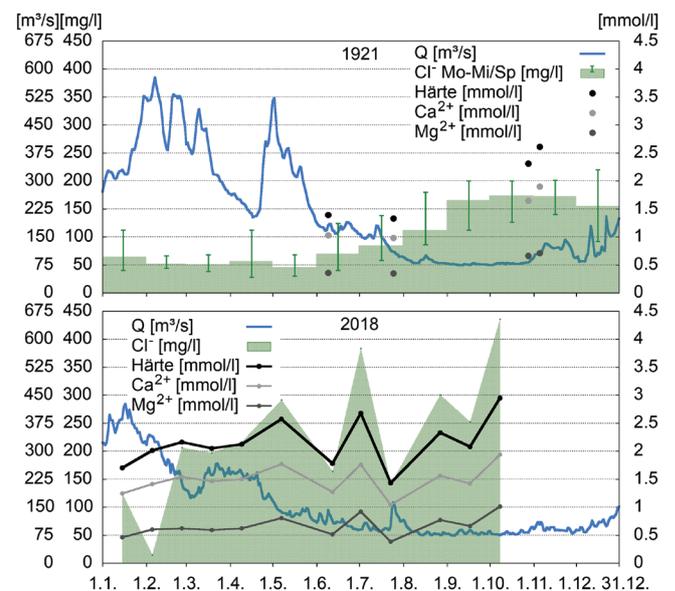


Abbildung 12
Chloridkonzentration und Wasserhärte der Oder in Breslau im Jahr 1921 (LÜHRIG, 1924) und 2018 (IKSO, 2021) sowie Durchfluss am Pegel Eisenhüttenstadt.
Chloride concentration and water hardness of the Oder in Breslau 1921 (LÜHRIG, 1924) and 2018 (IKSO, 2021) as well as discharge at the Eisenhüttenstadt gauge.

Zeitraum 1918 bis 1924 – ein (sehr) hohes Niveau verschiedener Wasserinhaltsstoffe (z. B. Abdampfrückstand: 641 bzw. 642 mg/l, Glührückstand: 553 bzw. 548 mg/l, Glühverlust: 88 bzw. 94 mg/l, Calcium: 1,65 bzw. 1,90 mmol/l, Magnesium: 0,66 bzw. 0,71 mmol/l, KPMV: 42 bzw. 41 mg/l). Der sehr hohe Glührückstand weist in Verbindung mit der Schilderung einer bräunlich-gelben Wasserfärbung (LÜHRIG, 1924) auf reichlich Salze und Tonminerale im Wasser hin, der Glühverlust in Kombination mit dem hohen KPMV auf (leicht abbaubare) organische Substanz.

Im Jahr 2018 stieg die Chloridkonzentration (monatliche Stichproben bei Wrocław (Breslau) – IKSO, 2021) bei abnehmender Wasserführung stark an und erreichte ein höheres Konzentrationsniveau als 1921.

4 Weitere Auswirkungen des Niedrigwassers

4.1 Wasserversorgung

Probleme bei der Wasserversorgung im Trockenjahr 1921 traten im Rheingebiet in besonderer Schärfe auf: Die Ruhrtalsperren (Stauraum 191 Mio. m³) waren im Frühjahr 1921 nach schwacher Erholung von der Trockenheit im vorangehenden Herbst (Kap. 2.4) nur zu zwei Drittel gefüllt (Höchststand am 19. Februar) und erreichten ihren Tiefststand im Dezember 1921. Die Wasserversorgung im Ruhrgebiet konnte mit Mühe aufrechterhalten werden. Kritisch wurde eine Woche im Dezember bei scharfem Frost, als die Abgabe aus Staubecken im Oberlauf der Ruhr zurückgehalten wurde (LINK, 1922; OFFERGELD, 1922). Am 14. April 2018 hatten die Ruhrtalsperren einen Füllstand von 94 % des Gesamtstauinhalts (472 Mio. m³) erreicht, der durch die anhaltende Trockenheit der nachfolgenden Monate bis auf 43 % am 2. Dezember sank. Vorgeschriebene Mindestabflüsse an Pegeln wurden mit Ausnahmegenehmigungen temporär reduziert, die Wasserversorgung war jederzeit gewährleistet (RUHRVERBAND, 2019, 2020).

Die Stadt Barmen (Wuppertal) konnte 1921 nur durch starke Beanspruchung des alten Grundwasserwerks Volmarstein ein Versagen ihrer Wasserversorgung (überwiegend Talsperrenwasser) verhindern. Mit Einschränkungen des Wasserverbrauchs für Industrie und Haushalte (stundenweise Sperrung, Druckminderung im Leitungsnetz) wurde versucht, die Versorgung zu sichern (OFFERGELD, 1922). Die Trinkwassertalsperren des Wupperverbandes erreichten im Dezember 2018 ihr Jahresminimum, waren mit rund 40 Mio. m³ jedoch noch besser gefüllt als im Oktober des Folgejahres 2019 (WUPPERVERBAND, 2020).

Bei den Uferfiltration nutzenden Wasserwerken am Niederrhein war je nach Entfernung der Brunnen vom Rhein eine schnelle oder langsame Beeinflussung des Grundwasserspiegels feststellbar. Das Minimum des Grundwasserspiegels wurde Ende 1921 bzw. Anfang 1922 erreicht. Der Wiederanstieg des Grundwassers auf normale Spiegelhöhe erfolgte beim Wasserwerk Bergisch-Gladbach (3,75 km Rheinentfernung) erst 16 bis 17 Monate nach dem tiefsten Rheinpegelstand (RUTSATZ, 1925).

4.2 Schifffahrt

"Insgesamt ist das Jahr 1921 [...] das ungünstigste gewesen, das die Rheinschifffahrt je erlebt hat." konstatierte SCHLEICHERT (1922). Infolge des Niedrigwassers gelang es den großen Schleppkähnen selbst mit geringer Belastung höchstens bis in die Gegend von Oberwesel vorzudringen. Schon von Bornhofen ab war der Rhein mit ankernden Kähnen verstopft, die kilometerweit oft zu 15 bis 20 nebeneinander zum Leichtern lagen (BELLINGHAUSEN, 1922). Zahlreiche Schiffsunfälle machten zeitraubende und kostspielige Leichterungen notwendig und verursachten außerordentlich hohe Reparaturkosten. Hinzu kamen Kriegsnachwirkungen (Gebietsabtretungen, Abtretung eines Teils der Binnenschifffahrtsflotte gemäß Versailler Vertrag sowie die Rheinlandbesetzung), ein Streik der Maschinisten und Heizer im Juli 1921 und eine starke Konkurrenz durch günstige Eisenbahnfrachttarife (SCHLEICHERT, 1922). Der nach der Volksabstimmung in Oberschlesien 1921 ausgebrochene Polenaufrüstung brachte monatelang die Hütten- und Kohleindustrie – wichtige Auftraggeber der Oder-Frachtschifffahrt – zum Stillstand (FABIAN, 1927). Der starke Rückgang der Beförderungsleistung (Tab. 5) in Deutschland gegenüber 1920 ergibt sich vor allem aus Rückgängen im Rhein- und Odergebiet.

Während der langen Niedrigwasserphase 2018 konnten Schiffe auf dem Rhein streckenweise zwei Drittel weniger laden. Vermehrt waren Schiffe mit geringen Tiefgängen unterwegs. Deutliche Rückgänge der transportierten Gütermengen führten in der chemischen Industrie und bei der Versorgung mit Kraftstoffen zu Engpässen und Einschränkungen (WEINOLDT, 2019). Der Rückgang der Beförderungsleistung (Tab. 5) in Deutschland gegenüber 2017 resultierte vor allem aus Transportminderungen im Rheingebiet, wobei das Donaugebiet prozentual den stärksten Rückgang zu verzeichnen hatte. Durch Einbeziehung der Unterelbe und des Elbe-Seitenkanals in die statistische Betrachtung des Elbegebietes werden geringe Transportleistungen auf Ober- und Mittelelbe überdeckt. Eine direkte Vergleichbarkeit der Angaben in Tabelle 5 ist hinsichtlich des Betrachtungsraums,

Tabelle 5

Beförderungsleistung der Binnenschifffahrt (Güterverkehr) in Mrd. Tonnenkilometern für Deutschland in den jeweiligen Grenzen sowie für einzelne Flussgebiete in den Jahren 1921 (STATISTISCHES REICHSAMT, 1923) und 2018 (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2019) sowie den Vorjahren. *Service by inland waterway transport (cargo) in billion ton kilometers for Germany in the respective borders and for individual river basins during 1921 (STATISTISCHES REICHSAMT, 1923) and 2018 (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2019) and the previous years.*

Jahr	Deutschland	Rhein	Weser	Elbe	Oder	Donau
1920	11,4	6,32	0,15	1,53	1,57	0,03
1921	8,8 (- 22,8 % zu 1920)	5,16	0,14	1,39	0,56	0,02
2017	55,5	43,95	0,71	2,15	0,19	1,52
2018	46,9 (- 15,5 % zu 2017)	37,12	0,68	2,14	0,15	1,00

des Ausbaus der Wasserstraßen und der eingesetzten Schiffe jeweils nur mit dem Vorjahr gegeben.

5 Schlussfolgerungen

Nach dem bereits sehr niederschlagsarmen Herbst 1920 war das Kalenderjahr 1921 in weiten Teilen Europas außergewöhnlich trocken. Anhaltende niederschlagsarme Großwetterlagen dominierten im Jahr 1921 in Deutschland an 216 Tagen. An einigen Messstationen im Rhein- und Donaugebiet wurde 1921 der mit Abstand niedrigste Jahresniederschlag der gesamten Messreihe registriert. Die Trockenphasen verteilten sich zudem über das gesamte Jahr, betrafen mit Ausnahme des Januars auch die ersten Monate des Jahres und begrenzten damit, besonders an Donau und Rhein, die für eine Erholung des Wasserhaushalts wichtige Grundwasserneubildung. Die damit bereits zu Beginn des Jahres und noch stärker zu Beginn des Sommers vorhandenen Defizite im Wasserhaushalt der Flussgebiete wurden aufgrund anhaltend unterdurchschnittlicher Niederschläge auch im weiteren Jahresverlauf nicht kompensiert und verschärften sich weiter.

Im Vergleich dazu traten 2018 nach vorangehend feuchtem Winter – und damit einhergehender Grundwasserneubildung – trockene Wetterlagen weniger häufig (an 130 Tagen) und erst im Herbst vorrangig in längeren Phasen auf. Die damit zu Beginn des Sommers günstigere hydrologische Ausgangslage trug verbreitet (Rhein, Donau oberhalb Innzufluss, Weser) und wesentlich dazu bei, dass sich die Niedrigwassersituation im weiteren Verlauf des Jahres 2018 trotz höherer Lufttemperaturen weniger stark entwickelte als im Jahr 1921. Auch beendeten die hohen Niederschläge im Dezember 2018 das Niedrigwasser vielerorts eher als im Verlauf des Jahres 1921.

Ein weiterer Unterschied zwischen diesen beiden Niedrigwasserjahren ist der im Jahr 1921 in den meisten Flussgebieten geringere Einfluss von Talsperren, insbesondere an der Elbe. Auch ein bei Niedrigwasser stützender Einfluss von gereinigtem Abwasser (RIEDEL et al., 2021) war 1921 sicherlich schwächer als 2018.

Infolge dieser Rahmenbedingungen gab es 1921, wengleich mit teils unterschiedlichen Jahresverläufen, stark ausgeprägte Niedrigwasserphasen in allen großen Flussgebieten Mitteleuropas. Dies gilt sowohl für die erreichten Durchflussminima als auch für die Niedrigwasserdauern. Am stärksten betroffen waren im Ganzen der Rhein und die Donau (oberhalb des Innzuflusses) sowie die Weser. An diesen Flüssen traten 1921 die – oft bei Weitem – längsten MNQ-Unterschreitungsdauern des Durchflusses (sumD) der vergangenen 120 Jahre auf. Auch die Durchflussminima (NM7Q) an Rhein, Weser und Donau gehören zu den niedrigsten Werten in diesem Zeitraum, wie auch an der Oder, wo allerdings Vergleichswerte erst ab 1921 vorliegen.

Das Niedrigwasserjahr 2018 betraf ebenfalls alle großen Flüsse in Deutschland, überbot das Ausmaß des Jahres 1921 hinsichtlich der Dauern von maxD und sumD aber nur an der Elbe und am Oderpegel Eisenhüttenstadt deutlich. Unterschreitungsdauern in zumindest ähnlicher Größenordnung traten 2018 am Oderpegel Hohensaaten, am Weserpegel Intschede und am Rheinpegel Köln (hier nur maxD) auf (Abb. 7 und 8). Bei den Durchflussminima erreicht im Jahr 2018 nur der NM7Q des Oderpegels Eisenhüttenstadt annähernd das niedrige Niveau des NM7Q 1921.

Jedoch ist oftmals zu berücksichtigen, dass der NM7Q 2018 durch Talsperrenbetrieb, wie es ihn im Jahr 1921 noch nicht in vergleichbarem Ausmaß gab, aufgehört wurde. Auch andere bekannte Niedrigwasserjahre des Zeitraums 1901 bis 2020 (1911, 1934, 1947, 1949, 1959) erreichten nicht die extreme, ganz Mitteleuropa umfassende Ausdehnung des Niedrigwasserjahres 1921, das seit Beginn des 20. Jahrhunderts ohnegleichen ist.

An der Elbe mit ihrem pluvialen Abflussregime fielen Niedrigwasser und hohe Wassertemperaturen in den Jahren 1921 und 2018 zeitlich zusammen. Dies gilt nicht für Rhein und Donau mit nivalen und glazialen sommerlichen Schmelzwasserzuflüssen aus dem Hochgebirge. An allen betrachteten Messstellen waren der höchste Tageswert und das größte Monatsmittel der Wassertemperatur 2018 höher als 1921. Dies kann vor allem höheren Lufttemperaturen und insbesondere am Rhein auch Kühlwasser-einleitungen zugeschrieben werden.

Durch die fehlende Verdünnung traten während des Niedrigwassers 1921 solche lokalen und regionalen Belastungsschwerpunkte besonders hervor, die von Einleitungen organischer Substanz sowie von salzigen und harten Abwässern verursacht waren. In Rhein, Elbe und Oder wurden außergewöhnlich hohe Werte des KPMV und des Glühverlustes gemessen. Im dicht besiedelten Rheintal, in dem – wie auch andernorts – Kläranlagen aber noch weitgehend fehlten oder nur unzureichend wirksam waren, ist dies wahrscheinlich in erster Linie auf kommunale Abwassereinleitungen zurückzuführen. In der Elbe bei Magdeburg spielten im Herbst 1921 vermutlich Einleitungen aus der Zuckerrübenindustrie die größte Rolle für die Belastung mit sauerstoffzehrender organischer Substanz.

Das bereits im Jahr 1921 an Weser und Elbe (stromab der Saale-mündung) bestehende Problem der Versalzung und Verhärtung des Flusswassers durch Einleitungen der Kali-Industrie führte beim Niedrigwasser zu hohen Konzentrationsspitzen und war 2018 insbesondere an der Weser immer noch akut. Im Jahr 2018 lag das Konzentrationsniveau von Härtebildnern an der Weser und das von Chlorid an Rhein und Oder höher als 1921. Es wird deutlich, dass die häufige Probenahme an einzelnen Untersuchungsstellen wie im Jahr 1921 die Identifikation von Konzentrationsspitzen ermöglicht, die bei lediglich monatlicher Probenahme nach heutigen Routinemessprogrammen nicht erfassbar sind. Bei extremen Niedrigwasserphasen ist eine Verkürzung der Probenahmeintervalle auf höchstens 14 Tage empfehlenswert, wie beim praxiserprobten "Messprogramm für hydrologische Extremereignisse an der Elbe" (FGG ELBE, 2016).

Auswirkungen auf die Wasserversorgung waren 1921 wie 2018 regional spürbar. Die Zunahme des Talsperrenvolumens sowie die Etablierung von Fernwasserversorgungen und Versorgungsverbänden und nicht zuletzt der höhere Niederschlag im Winter 2017/18 trugen im Jahr 2018 zu einer etwas weniger angespannten Lage der Wasserversorgung bei. Der ökologische Mindestwasserabfluss wurde gegenüber der Versorgungssicherheit nachrangig behandelt.

Die Schifffahrt war in den Jahren 1921 und 2018 vom Niedrigwasser stark betroffen. Die Randbedingungen sind jedoch nicht direkt vergleichbar. Der Rückgang der Beförderungsleistung betraf 1921 vor allem Rhein und Oder, 2018 besonders Rhein und Donau.

Für eine Betrachtung langanhaltender trockener Zustände bietet sich das Niedrigwasserjahr 1921 besonders an großen Flüssen als Modell- bzw. Referenzjahr für weiterführende gewässerkundliche Untersuchungen an, etwa

- als Plausibilisierungsbezug bei der Rekonstruktion historischer Niedrigwasserereignisse;
- zur Abschätzung der natürlichen Spannweite von Niedrigwasserereignissen im Rahmen der Naturalisierung von Abflussdaten;
- zur Absicherung von Niedrigwasser-Extremwertstatistiken durch zeitliche Informationserweiterung gekoppelt mit hydrologischer Interpretation;
- zur Plausibilisierung extremer Niedrigwasserphasen in Zukunftsprojektionen;
- bei der Simulation von Szenarien minimaler Verdünnung von Abwasser bzw. flussgebietsrelevanten Schadstoffen;
- zur Veranschaulichung beim Vergleich von Niedrigwasserstatistiken oder -szenarien mit diesem real aufgetretenen Extremjahr;
- als Beitrag zur wasserwirtschaftlichen Planung für extreme Trockenphasen hinsichtlich der Verfügbarkeit und Nutzung stark begrenzter Wasserressourcen, unter anderem mit der entsprechenden Steuerung von Talsperren und weiteren Speichern.

Ermöglicht wird dies durch einen guten Fundus von Messdaten, der durch die Erschließung und Digitalisierung weiterer Datenquellen noch vergrößert werden kann.

Conclusions

Following an autumn with very little precipitation, the calendar year 1921 was exceptionally dry in large parts of Europe. Persistent, low-precipitation atmospheric conditions dominated in Germany on 216 days in 1921. At some weather stations in the Rhine and Danube catchment, by far the lowest annual precipitation totals of the entire series of measurements were recorded in 1921. Dry weather periods were spread over the entire year and, with the exception of January, also affected the first months of the year. Hence, they limited groundwater recharge, which is important for a recovery of the water balance. This was especially the case on the Danube and Rhine rivers. Deficits in the water balance, thus occurring in the river basins already at the beginning of the year and still more at the beginning of the summer, were not compensated and became even worse in many places during the further course of the year, due to persistently below-average precipitation depths.

In comparison in the year 2018 with a preceding wet winter (and corresponding groundwater recharge), dry weather conditions occurred less frequently (on 130 days), and in longer periods mainly in autumn. Hence, the hydrological situation at the beginning of the summer was more favorable and contributed widely (Rhine, Danube above the Inn tributary, Weser) and significantly to a less strong development of the low flow situation in the

further course of 2018 than in 1921, despite higher air temperatures. Moreover, high precipitation in December 2018 also ended the low flow phase in many places earlier than in the course of 1921.

Another difference between these two low flow years is the weaker influence of reservoirs in most river basins in 1921, especially in the Elbe basin. The sustaining influence of treated wastewater on low flow (RIEDEL et al., 2021) is also likely to have been weaker in 1921 than in 2018.

As a result of these conditions, there were pronounced phases of low flow in all major river basins in Central Europe in 1921 (albeit with different annual courses in some cases). This applies both to the minimum flow rates achieved and to the durations of low flow. Overall, the Rhine and Danube (upstream of the Inn tributary) and the Weser were most severely affected. In 1921, the longest annual total duration of discharge below MNQ (sumD) of the last 120 years occurred on these rivers - often by far. The flow minima (NM7Q) on the Rhine, Weser and Danube are also among the lowest values in this period, as is the case on the Oder, related to the period since 1921.

The low flow year 2018 also affected all major rivers in Germany, but significantly exceeded the extent of the year 1921 in terms of its duration parameters maxD and sumD only at the Elbe river and at the Oder gauge Eisenhüttenstadt. Durations of at least similar magnitude like in 1921 were also achieved at the Oder gauge Hohensaaten, the Weser gauge Intschede and the Rhine gauge Cologne (here only maxD) (Fig. 7 and 8). Regarding discharge minima, only the NM7Q 2018 of the Eisenhüttenstadt gauge came close to the NM7Q 1921. However, it must be taken into account that NM7Q 2018 was often increased by reservoir operation (not in place in 1921). Other well-known low flow years in the period 1901 to 2020 (1911, 1934, 1947, 1949, 1959) also did not reach the extreme and vast extent of the low flow year 1921 which concerned the entire area of Central Europe and remained unique since the beginning of the 20th century.

On the Elbe with its pluvial discharge regime, low water and high water temperatures coincided in 1921 and 2018. This does not apply to the Rhine and Danube with their nival and glacial summer meltwater inflows from high mountain ranges. The highest daily and the largest monthly mean of the water temperature in 2018 were higher than those of 1921 at all measuring points examined. This is mainly attributed to higher air temperatures and, especially on the Rhine, cooling water discharges.

Due to the lack of dilution of wastewater, discharges with easily degradable organic matter as well as of salty and hard wastewater, aggravated local and regional focal points of pollution during the low flow period in 1921. Exceptionally high levels of potassium permanganate consumption and ignition loss were measured in the Rhine, Elbe and Oder. In the densely populated Rhine Valley, where – as elsewhere – sewage treatment plants were still largely absent or only insufficiently effective, this is probably primarily due to municipal wastewater discharges. In the autumn of 1921, discharges from the sugar beet industry presumably played the major role in the pollution with oxygen-consuming organic matter in the Elbe near Magdeburg. The problem of salinisation and hardening of river water due to discharges from the potash industry, which already existed in 1921 on the Weser

and Elbe (below the Saale confluence), led to high concentration peaks during the low flow and was still acute in 2018, particularly on the Weser. In 2018, the concentration level of hardness formers on the Weser and that of chloride on the Rhine and Oder were higher than in 1921. The high frequency of sampling at individual monitoring sites in 1921 enables the identification of concentration peaks that cannot be detected in present-day monthly sampling by routine measurement programs. During extreme low flow phases, it is advisable to shorten the sampling intervals to a maximum of 14 days, as is the case with the tried and tested "Measurement program for extreme hydrological events on the Elbe" (FGG ELBE, 2016).

Effects on the water supply were noticeable regionally in 1921 and 2018. The increased reservoir volumes as well as the establishment of long-distance water supplies and supply networks and, last but not least, the higher rainfall in winter 2017/2018 contributed to a less tense water supply situation in 2018. The ecological minimum streamflow was of less concern than the security of water supply.

Shipping was strongly affected by the low water levels in 1921 and 2018. However, the conditions were not directly comparable in these two years. The decline in transport performance mainly affected the Rhine and Oder in 1921 and the Rhine and Danube in 2018.

Considering long-lasting dry conditions and in particular large rivers, the low flow year 1921 is an appropriate model or reference year for further hydrological investigations, such as

- a plausible reference when reconstructing historical low flow events;
- the estimation of the natural range of low flow events in the context of the naturalization of discharge data;
- the validation of low flow extreme value statistics by temporal information expansion coupled with hydrological reasoning;
- the verification of plausibility of extreme low flow phases in simulated future projections;
- the simulation of scenarios of minimal dilution of wastewater or pollutants relevant to river basins;
- the illustration of low flow statistics or scenarios compared to the reality of this extreme year;
- a contribution to water management planning for extreme dry phases with regard to the availability and use of severely limited water resources, including the corresponding control of reservoirs and other storages.

This is made possible by a substantial pool of measured data, which can be increased by the search and digitization of further data sources.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die Daten, auf denen die Erkenntnisse dieser Studie beruhen, sind im Literatur- und Quellenverzeichnis referenziert. Daten Dritter können ggf. nur mit deren Zustimmung auf ordnungsgemäße Anfrage durch die Verfasser bereitgestellt werden.

Danksagung

Die Autoren danken Libor Elleder und Klaus Wendling für die Erlaubnis zur Publikation der Fotos, Cathleen Kunzer, Simone Andernach und Claudia Werner für zahlreiche Literaturbeschaffungen sowie vielen weiteren Personen und Institutionen für die Bereitstellung von Daten und Archivmaterial.

Anschriften der Verfasser

Dr. Daniel Schwandt

Dr. Gerd Hübner

Referat G1 Grundsatzfragen der qualitativen Gewässerkunde

Dr. Martin Helms

Jörg Uwe Belz

Wilfried Wiechmann

Referat M1 Hydrometrie und Gewässerkundliche Begutachtung

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz

schwandt@bafg.de

huebner@bafg.de

helms@bafg.de

belz@bafg.de

wiechmann@bafg.de

Literatur- und Quellenverzeichnis

AU (Abwasser-Untersuchungsstelle) HILDESHEIM (1922): Jahresbericht der Abwasser-Untersuchungsstelle in Hildesheim über das Jahr 1921/22. Bundesarchiv R 154 / 12521 (unveröffentlicht).

BACHMANN, C. (1927): Die Talsperren in Deutschland. Wasser und Gas, 17. Jg., Nr. 22, 15.8.1927, Berlin.

BARCH – Bundesarchiv Berlin (o. J.): R 154 / 12265: Verkehr mit der Abw.-Untersuchungsstelle der Regierung in Hildesheim (Enthalten die Untersuchungsergebnisse der Weser, Leine, Innerste, Aller, Schunter und Oker). 1921 – 1925 (unveröffentlicht).

BELLINGHAUSEN, H. (1922): Geologisch-Geographischer Führer durch die Umgebung von Coblenz. Krabbensche Buchdruckerei, Coblenz.

BELZ, J.U., BRAHMER, G., BUITEVELD, H., ENGEL, H., GRABHER, R. et al. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. Schriftenreihe der KHR, Bd. I-22, Koblenz und Lelystad.

BLANCHARD, R. (1922): La sécheresse en Dauphiné (1920 – 1921). Revue de géographie alpine, 10, n° 1, 181-199.

BLfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021): Niedrigwasser 2018 und 2019 – Analysen und Auswirkungen für Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.

BROOKS, C.E.P. & J. GLASSPOOLE (1922): The drought of 1921. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 48, 139-68.

BWSD – Badische Wasser- und Straßenbaudirektion Karlsruhe (1933): Jahrbuch des Hydrographischen Bureaus 1930 und 1931. Karlsruhe.

CANTZLER, A. & A. SPLITTGERBER (1916): Die Ergebnisse von Rheinwasseruntersuchungen aus den Jahren 1907 bis 1913 auf der Strecke von Mannheim bis Worms. Vereinsschriften des Vereins für Wasser- und Gaswirtschaft e. V., Deutscher Kommunal-Verlag, Berlin-Friedenau.

- COOK, E.R., SEAGER, R., KUSHNIR, Y., BRIFFA, K.R., BÜNTGEN, U. et al. (2015): Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. *Science Advances* 1 (10), e1500561. DOI: 10.1126/sciadv.1500561.
- DUBAND, D., SCHOENEICH, P. & V.A. STANESCU (2004): Exemple de l'étiage 1921 en Europe (Italie, France, Roumanie, Suisse, ...): climatologie et hydrologie. *La houille blanche*, No. 5: 18-29.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2018): Monatlicher Klimastatus Deutschland [Januar – Dezember] 2018. https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_monat_klimastatus/monat_klimastatus.html (letzter Abruf: 27.10.2021).
- DWD-CDC (Deutscher Wetterdienst – Climate Data Center) (2020): Tägliche Stationsmessungen Niederschlagshöhe in mm. <https://cdc.dwd.de/portal/> (letzter Abruf: 11.12.2020).
- DWD-CDC (Deutscher Wetterdienst – Climate Data Center) (2021): Jahressumme der Raster der monatlichen Niederschlagshöhe für Deutschland unter Berücksichtigung der Klimatologie, Version v1.0. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/annual/precipitation/ (letzter Abruf: 27.10.2021).
- DWD-CDC (Deutscher Wetterdienst - Climate Data Center) (2022): Regional gemittelte monatliche Niederschlagshöhen und Lufttemperaturen. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/monthly/ (letzter Abruf: 11.3.2022).
- DREWAG – Dresdner Gas-, Wasser- und Elektrizitätswerke AG (1921): Laboratorium der Wasserwerke, Entnahmestelle: Elbe bei Saloppe 1921 (unveröffentlicht).
- ECKARDT, W.R. (1922): Über die Ursachen der Trockenheit 1920/21 und deren wirtschaftliche Folgen am Niederrhein und im Ruhrgebiet. *Wirtschaftliche Nachrichten aus dem Ruhrbezirk* 3 (15): 718-722, Essen.
- ELLEDER, L., KAŠPÁREK, L., ŠIROVÁ, J. & T. KABELKA (2020): Low water stage marks on hunger stones: verification for the Elbe from 1616 to 2015. *Climate of the Past*, 16, 1821-1846. DOI: 10.5194/cp-16-1821-2020.
- ERFURT, M., GLASER, R. & V. BLAUHUT (2019): Changing impacts and societal responses to drought in southwestern Germany since 1800. *Regional Environmental Change*, 19, 2311-2323. DOI: 10.1007/s10113-019-01522-7.
- FABIAN, W. (1927): Die obere und mittlere Oder als Schifffahrtsstraße. In: *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft*. Bd. 8, 1925, Hamburg, S. 45-60.
- FGG (Flussgebietsgemeinschaft) ELBE (2016): Messprogramm für hydrologische Extremereignisse an der Elbe. https://www.fgg-elbe.de/files/Download-Archive/Messprogramme/fggelbe/MP_Extremereignisse_Fortschreibung_01_09_2016_Anlage_2angepasst_01_2019.pdf (letzter Abruf: 27.10.2021).
- FORSTER, A. (1894): Die Temperatur fließender Gewässer Mitteleuropas. In: PENCK, A. (Hrsg.): *Geographische Abhandlungen*. Band V, Heft 4. Verlag Ed. Hölzel, Wien.
- GRUNOW, J. (1935): Die Wasserklemmen der Norddeutschen Ströme in den Jahren 1891-1930. – *Forschungen zur Deutschen Landes- und Volkskunde* 31 (2), 74 S., Stuttgart.
- GLASER, R. & M. KAHLE (2020): Reconstructions of droughts in Germany since 1500 – combining hermeneutic information and instrumental records in historical and modern perspectives. *Climate of the Past*, 16, 1207-1222. DOI: 10.5194/cp-16-1207-2020.
- HANEL, M., RAKOVEC, O., MARKONIS, Y., MÁCA, P., SAMANIEGO, L. et al. (2018): Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective. *Nature, Scientific Reports* 8:9499. DOI: 10.1038/s41598-018-27464-4.
- HARZWASSERWERKE (2020): Infomaterial (Flyer mit Informationen zu den Talsperren). <https://www.harzwasserwerke.de/infoservice/infomaterial/> (letzter Abruf: 4.10.2021).
- HSTA – Sächsisches Hauptstaatsarchiv Dresden (o. J.): 10762 Amtshauptmannschaft Pirna Nr. 3335: Verfahren der Elbeverunreinigung, 2. Bericht der Landesstelle für Öffentliche Gesundheitspflege Dresden, 26.9.1921, S. 31-36 (unveröffentlicht).
- HÜBNER, G. & D. SCHWANDT (2018): Extreme low flow and water quality – a long-term view on the River Elbe. *Erdkunde – Archive for Scientific Geography*, Bonn 72 (3): 235-251. DOI: 10.3112/erdkunde.2018.03.05.
- HÜBNER, G. & D. SCHWANDT (2020a): Wasserbeschaffenheit beim Elbe-Niedrigwasser 2018 – ein Langzeitvergleich. In: *Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL) (Hrsg.): Ergebnisse der Jahrestagung 2019 (Münster)*, S. 344-350.
- HÜBNER, G. & D. SCHWANDT (2020b): Wasserbeschaffenheit der Elbe während des extremen Niedrigwassers von Juli bis Dezember 2018, FGG Elbe (Hrsg.): *Fachberichte Hochwasser/Niedrigwasser*. https://www.fgg-elbe.de/files/Download-Archive/Fachberichte/Hochwasser_Niedrigwasser/Elbe_Niedrigwasserbericht_2018_Stand_2020_05-08.pdf (letzter Abruf: 27.10.2021).
- INFORMATIONSPLATTFORM UNDINE (o. J.): Rhein: Das Niedrigwasser der Jahre 1920/21 (https://undine.bafg.de/rhein/extremereignisse/rhein_nw1920_21.html); Weser: Das Niedrigwasser von Juli bis Dezember 1921 (https://undine.bafg.de/weser/extremereignisse/weser_nw1921.html); Oder: Das Niedrigwasser im Sommer / Herbst 1921 (https://undine.bafg.de/oder/extremereignisse/oder_nw1921.html) (letzter Abruf: 27.10.2021).
- IKSE – Int. Kommission zum Schutz der Elbe (2001): Bestandsaufnahme des vorhandenen Hochwasserschutzes im Einzugsgebiet der Elbe. Magdeburg.
- IKSE – Int. Kommission zum Schutz der Elbe (Hrsg.) (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. Magdeburg.
- IKSE – Int. Kommission zum Schutz der Elbe (2012): Abschlussbericht über die Erfüllung des "Aktionsplans Hochwasserschutz der Elbe" 2003-2011. Magdeburg.
- IKSO – Int. Kommission zum Schutz der Oder gegen Verunreinigung (2015): Bewirtschaftungsplan für die internationale Flussgebietseinheit Oder im Bewirtschaftungszeitraum 2016–2021. Breslau.
- IKSO – Int. Kommission zum Schutz der Oder (Hrsg.) (2021): IMS-Odra (Internationale Monitoring-Stationen im Odergebiet) <http://geoportal.mkoo.pl/IKSO/client/gisclient/index.html?applicationId=5279> (letzter Abruf: 27.10.2021).
- IKSR – Int. Kommission zum Schutz des Rheins (2018): Bestandsaufnahme zu den Niedrigwasserverhältnissen am Rhein. IKSR-Bericht Nr. 248. Koblenz.
- KACHELMANNWETTER (2021): <https://kachelmannwetter.com/de/messwerte/durchschnittstemperatur.html> (letzter Abruf: 06.10.2021).
- LAND NRW (2021): Fachinformationssystem ELWAS-WEB, Messstelle 000309, Düsseldorf-Flehe, Rhein, Daten des Jahres 2018. <https://www.elwasweb.nrw.de> (letzter Abruf: 27.10.2021).
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1998): Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken in der Bundesrepublik Deutschland mit mehr als 0,3 hm³ Speicherraum. Kulturbuchverlag, Berlin.
- LHW (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft) SACHSEN-ANHALT (2020): Gewässerkundlicher Landesdienst, Zahlentafeln Fließgewässer 2018, MEL07. https://lhw.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/Landesbetriebe/LHW/neu_PDF/5.0_GLD/Gew_Daten_2018/MEL07_Wasser_EP_2018.pdf (letzter Abruf: 27.10.2021).

- LINK, E. (1922): Die Talsperren des Ruhrgebiets. Zeitschrift des Deutschen Wasserwirtschafts- und Wasserkraft-Verbandes E. V., Heft 6, Juni 1922, S. 99-102.
- LfG – Landesanstalt für Gewässerkunde und Hauptnivelements beim Generalinspektor für Wasser und Energie (1943): Jahrbuch für die Gewässerkunde des Deutschen Reichs. Abflußjahr 1939. Berlin.
- LUBW – Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2020): Wassertemperatur 2018 Messstation Karlsruhe, Rhein.
- LÜHRIG, H. (1924): Ueber die Beschaffenheit des Wassers der Oder bei Breslau und einiger ihrer Nebenflüsse. Mitteilung aus dem chemischen Untersuchungsamt der Stadt Breslau. Wasser und Gas 15 (1), S. 1-19, Berlin.
- MÜHLENS, P. (1923): Die russische Hunger- und Seuchenkatastrophe in den Jahren 1921 – 1922. Zeitschrift für Hygiene, Bd. 99, S. 1-45.
- NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2021): Landesdatenbank für wasserwirtschaftliche Daten. <http://www.wasserdaten.niedersachsen.de> (letzter Abruf: 27.10.2021).
- OFFERGELD, L. (1922): Wasservorratsbewegung in den Trinkwassersperren. Das Gas- und Wasserfach, Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, 65. Jg., H. 43, S. 681-686.
- POVODI LABE (2017): Dams in the Czech Republic.
- RIEDEL, T., NOLTE, CH., AUS DER BEEK, T., LIEDTKE, J., SURES, B. et al. (2021): Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. Texte 174/2021, Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- RIJKSWATERSTAAT (2020): Abfrage Wassertemperatur Lobith. <https://waterinfo.rws.nl/> (letzter Abruf: 11.12.2020).
- RUHRVERBAND (2019): Ruhrwassermenge 2018. <https://www.talsperrenleitzentrale-ruhr.de/informationen/veroeffentlichungen/> (letzter Abruf: 27.10.2021).
- RUHRVERBAND (2020): Ruhrwassermenge 2019. <https://www.talsperrenleitzentrale-ruhr.de/informationen/veroeffentlichungen/> (letzter Abruf: 27.10.2021).
- RUTSATZ, E. (1925): Beiträge zur Hydrologie des Rheintals. Das Gas- und Wasserfach, Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, 68. Jg., H. 49, S. 767-772, H. 50, S.786-791, H. 51, S.805-810.
- SASSENFELD, M. (1923): Trockenheit des Jahres 1921 im Rheingebiet. Meteorologische Zeitschrift, Bd. 40, S. 93.
- SCHWANDT, D., HÜBNER, G., ZAVARSKY, A. & K. FRICKE (2019): Wassertemperatur des Rheins bei Koblenz im Sommer 2018. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 63 (1), S.60-63.
- SCHLEICHERT, H. (1922): Die deutsche Rheinschiffahrt im Jahre 1921. In: ZEITLER, R. (Hrsg.): Wasserstraßen-Jahrbuch 1922, München, S. 51-56.
- SCHRIER, G. van der, ALLAN, R., OSSÓ, A., SOUSA, P.M., VYVER, H. van de et al. (2021): The 1921 European drought: Impacts, reconstruction and drivers. *Climate of the Past*, 17, 2201–2221. DOI: 10.5194/cp-17-2201-2021.
- STADT DRESDEN (1922): Monatsberichte des Statistischen Amtes der Stadt Dresden. Nr.1, Januar 1922, 45. Jg., S.14 (Wasserwerke).
- STADT MAGDEBURG (1921): Verwaltungsbericht der städtischen Gas- und Wasserwerke Magdeburg für 1920. Stadtbibliothek Magdeburg: Ter P 10.1 Magdeburg (unveröffentlicht).
- STADT MAGDEBURG (1922): Verwaltungsbericht der städtischen Gas- und Wasserwerke Magdeburg für 1921. Stadtbibliothek Magdeburg: Ter P 10.1 Magdeburg (unveröffentlicht).
- STADT MANNHEIM (1922): Chemische u. bakteriologische Untersuchungen des Rhein- und Neckarwassers u. der Abwässer der Kläranlage; Sauerstoffprüfungen im Rheinwasser. Stadtarchiv Mannheim: Chemisches Untersuchungsamt, 56/1961 u. 32/1984 (Lfd.-Nr. 324), Blatt 113/114 (unveröffentlicht).
- STADTWERKE DÜSSELDORF (1921): Wasserwerk Flehe, Archiv, Laborbuch der bakteriologischen und chemischen Untersuchungen für das Jahr 1921. (unveröffentlicht).
- STADTWERKE DÜSSELDORF (2021): Wassertemperatur 2018 Messboje Heizkraftwerk Lausward.
- STAHL, K., WEILER, M., FREUDIGER, D., KOHN, I., SEIBERT, J. et al. (2017): Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Synthesenbericht. Schriftenreihe der KHR, Bd. I-25, Lelystad.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2019): Verkehr. Güterverkehrsstatistik der Binnenschiffahrt. Dezember 2018 ... [Januar 2017]. Fachserie 8 Reihe 4. https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00043795/2080400181124_akt06062019.pdf (letzter Abruf: 27.10.2021).
- STATISTISCHES REICHSAMT (1923): Verkehr der deutschen Binnenwasserstraßen im Jahre 1921, Erster Teil. Statistik des Deutschen Reichs, Band 306, I, Berlin.
- STRUB, W. (1923): Die Witterung im Jahre 1921. In: Statistisches Amt des Kantons Basel-Stadt (Hrsg.), Statistisches Jahrbuch des Kantons Basel-Stadt 1921, Erster Jahrgang, Basel, S. 298-300.
- TJADEN, H. (1922): Der gegenwärtige Stand der Flußverunreinigung durch die Abwässer der Kaliindustrie und die Wasserversorgung der Stadt Bremen. Bremen.
- VIA DONAU – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft (2020): Wassertemperatur Linz, Donau.
- WACHTER, H. (1934): Der Sommer 1934 im Vergleich mit 1911 und 1921. Das Wetter 51: (12): 405-407, Leipzig.
- WEBB, B. & F. NOBILIS (1995): Long term water temperature trends in Austrian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 40:1, 83-96. DOI: 10.1080/02626669509491392.
- WEINGARTNER, R. & C. PFISTER (2007): Wie außerordentlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/06? – Eine hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 51(1), S. 22-26.
- WEINOLD, C. (2019): Niedrigwasser beeinträchtigt die Rheinschiffahrt. In: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (Hrsg.): Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung 2018, Bonn, S. 56-57.
- WERNER, P.C. & F.-W. GERSTENGARBE (2010): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky. 7. Auflage. PIK Report 119, Potsdam.
- WILDENHAHN, E. & U. KLAHOLZ (1996): Große Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins. Bericht Nr. II-10 der KHR. Koblenz, Lelystad.
- WOLF-SCHUMANN, U., BUCHHOLZ, O., DORP, M., HELLBACH, C., BÜRVENICH, T. et al. (2013): Aufbau eines WHM LARSIM-Mitteuropa-modells. Projektbericht. Hydrotec, Aquantec, Aachen, Karlsruhe. (unveröffentlicht).
- WSA HANN. MÜNDEN (2014): Festschrift – 100 Jahre Edertalsperre. Druckschrift des Wasser- und Schifffahrtsamts Hann. Münden.
- WSV – Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2021): Wassertemperatur/Durchfluss von Pegeln an Bundeswasserstraßen, bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- WUPPERVERBAND (2020): Jahresbericht 2019. Wuppertal
- ZAVARSKY, A. & L. DÜSTER (2020): Anthropogenic influence on the Rhine water temperatures. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 5027-5041. DOI 10.5194/hess-24-5027-2020.