



Bestandsaufnahme zu den Niedrigwasserverhältnissen am Rhein

Stand: 04.05.2018

Internationale
Kommission zum
Schutz des Rheins

Commission
Internationale
pour la Protection
du Rhin

Internationale
Commissie ter
Bescherming
van de Rijn

Bericht Nr. 248



Impressum

Herausgeberin:

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)

Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 56068 Koblenz

Postfach 20 02 53, D 56002 Koblenz

Telefon +49-(0)261-94252-0, Fax +49-(0)261-94252-52

E-mail: sekretariat@iksr.de

www.iksr.org

IKSR-Expertengruppe „Niedrigwasser“ (EG LW)

Vorsitz: Gerhard Brahmer (HLNUG)

CH: Caroline Kan (BAFU)

F: Anne Toussirost (DREAL)

DE: Herbert Walter (WWA Aschaffenburg)

LUX: Noémie Patz, Daniel Göhlhausen (Administration de la Gestion de l'Eau)

NL: René van den Heuvel (Rijkswaterstaat)

AT (informelle Beteiligung): Ernst Überreiter (BMNT)

FL (informelle Beteiligung): Elija Kind (LLV)

ZKR (Beobachter): Kai Kempmann

KHR (Beobachter): Eric Sprokkereef

Alsace Nature (Beobachter): Jean Wencker

WWF NL (Beobachter): Bas Roels

IKSR-Sekretariat: Anne Schulte-Wülwer-Leidig, Adrian Schmid-Breton,

Dominique Falloux, Isabelle Traue, Fabienne van Harten, Marianne Jacobs

Bericht der EG LW

„Bestandsaufnahme zu den Niedrigwasserverhältnissen am Rhein“

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis.....	4
Anlagenverzeichnis	5
1. Zusammenfassung.....	6
2. Veranlassung und Problemstellung.....	8
2.1 Veranlassung und Problemstellung	8
2.2 Mandat der Expertengruppe Niedrigwasser.....	9
3. Vorliegende Untersuchungen im Rheingebiet, Nebeneinzugsgebieten und in anderen Flussgebieten	9
4. Begriffsbestimmungen, Definitionen und Vorgehensweise	12
5. Datengrundlage und Methoden	13
5.1 Messstellenauswahl und hydrologische Datengrundlage.....	13
5.2 Niedrigwasserkenngrößen.....	14
5.3 Auswerte- und Analysemethoden.....	15
6. Bestandsaufnahme	16
6.1 Hydrologische Verhältnisse im Rheingebiet	16
6.2 Bestandsaufnahme der Beeinflussungen der Abflussverhältnisse (Entnahmen, Einleitungen, Umleitungen, Wasserrückhalt und zeitversetzte Wasserabgabe)	17
6.3 Bestandsaufnahme der Betroffenheiten durch Niedrigwasser am Rhein.....	21
6.4 Nationales Niedrigwassermanagement	26
7. Untersuchung der historischen Pegelmessreihen am Rhein.....	30
7.1 Langfristverhalten der Niedrigwasserkennwerte.....	30
7.2 Referenzzeitraum und Niedrigwasserkenngrößen	34
7.3 Niedrigwasserabflüsse	37
7.4 Niedrigwasserdauern.....	42
7.5 Beschreibung und Einordnung ausgewählter historischer Niedrigwasserereignisse (Beispiel: das Niedrigwasser August/September 2003)	44
8. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse am Rhein	45
8.1 Ergebnisse aus vorliegenden Untersuchungen im Rheingebiet.....	45
8.2 Untersuchung der Abflussprojektionen COSMO-CLM4.8-A1B.....	48
8.3 Zu berücksichtigende Auswirkungen unter dem Aspekt der Niedrigwasservorsorge	49
9. Niedrigwassermonitoring	50
9.1 Ableitung einer Klassifizierung von Niedrigwasserverhältnissen.....	50
9.2 Validierung der Niedrigwasserklassifizierung mittels der historischen Zeitreihen	51
10. Schlussfolgerungen.....	55
Literatur	57
Anlagen.....	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der Untersuchungspegel am Rhein einschließlich langjähriger mittlerer Niedrigwasserabfluss an 7 aufeinanderfolgenden Tagen (MNM7Q)	14
Abbildung 2: Typisches Abflussregime im Rheineinzugsgebiet nach Pardé; Referenzzeitraum 1961-1990	16
Abbildung 3: Bedeutsame Ab- und Einleitungen am Rhein und im Einzugsgebiet	20
Abbildung 4: Überleitungssystem Donau-Main	21
Abbildung 5: Vereinfachte Wirkbeziehungen von Niedrigwasser auf die Wassernutzungen	21
Abbildung 6: Zyklus des Niedrigwassermanagements und damit zusammenhängende Handlungsfelder	26
Abbildung 7: Nationale Verdrängungsreihe Niederlande	29
Abbildung 8: Abflussganglinien für das Niedrigwasserereignis August/September im Wasserwirtschaftsjahr 2003	33
Abbildung 9: Jährliche Werte NM7Q am Pegel Diepoldsau und festgestellte Bruchpunkte	34
Abbildung 10: Jährliche Werte NM7Q am Pegel Maxau und festgestellte Bruchpunkte.....	35
Abbildung 11: Jährliche Werte NM7Q am Pegel Kaub und festgestellte Bruchpunkte.....	35
Abbildung 12: Jährliche Werte NM7Q am Pegel Köln und festgestellte Bruchpunkte.....	36
Abbildung 13: Trendanalyse der NM7Q-Serie am Pegel Basel	37
Abbildung 14: Trendanalyse der NM7Q-Serie am Pegel Köln	38
Abbildung 15: Trendanalyse der NM7Q-Serie für das Sommerhalbjahr (April-September) am Pegel Mainz	39
Abbildung 16: Trendanalyse der NM7Q-Serie für das Winterhalbjahr (November-März) am Pegel Mainz	40
Abbildung 17: Jahresserie der Kenngröße Unterschreitungsdauer MaxD (in Tagen) für den Pegel Kaub	44
Abbildung 18: Retrospektives Monitoring an den Pegeln Basel, Kaub und Lobith	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stauvolumina der Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins	18
Tabelle 2: Übersicht der Niedrigwasserereignisse 1920 bis 2015 am Rhein mit Angabe der Jährlichkeiten (statistische Eintrittswahrscheinlichkeiten) der kleinsten Abflussmenge „NM7Q“ und der maximalen Unterschreitungsdauer „MaxD“ < MNM7Q (Pegel Rekingen bis Lobith).	31
Tabelle 3: Mittel- und Niedrigwasserkennwerte an Pegeln am Rhein.....	32
Tabelle 4: Prozentuale Abflussanteile des Abflusses vom Pegel Basel	32
Tabelle 5: Zeitpunkte (Jahresangabe) von Bruchpunkten nach Sprunganalysen.....	36
Tabelle 6: Ergebnisse der Trendanalyse der NM7Q-Serien für den gesamten Untersuchungszeitraum und die homogene Referenzperiode (MK = Mann-Kendall-Test; FQS/t-Test = t-Test des Steigungskoeffizienten der Trendgerade).	38
Tabelle 7: Ergebnisse der Trendanalyse der NM21Q-Serien für den gesamten Untersuchungszeitraum und die homogene Referenzperiode (MK = Mann-Kendall-Test; FQS/t-Test = t-Test des Steigungskoeffizienten der Trendgerade).	39
Tabelle 8: Niedrigwasserabflüsse NM1Q bestimmter Wiederkehrintervalle, ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)	40
Tabelle 9: Niedrigwasserabflüsse NM3Q bestimmter Wiederkehrintervalle ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)	41
Tabelle 10: Niedrigwasserabflüsse NM7Q bestimmter Wiederkehrintervalle ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)	41
Tabelle 11: Niedrigwasserabflüsse NM21Q bestimmter Wiederkehrintervalle ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)	41
Tabelle 12: Niedrigwasserabflüsse NM60Q bestimmter Wiederkehrintervalle ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)	42
Tabelle 13: Durchschnittliche jährliche Unterschreitungstage des Schwellenwerts MNM7Q	42
Tabelle 14: Unterschreitungsdauern (Tage) n-jährlicher Niedrigwasser unterhalb des Schwellenwerts MNM7Q.....	43
Tabelle 15: Einordnung von Niedrigwasserkennwerten des Ereignisses 2003 in Wiederkehrintervalle	43
Tabelle 16: Bandbreite zur Veränderung des NM7Q an verschiedenen Rheinpegeln	46
Tabelle 17: Veränderungen der Niedrigwasserverhältnisse für die nahe Zukunft am Pegel Kaub (Abflussveränderung in %, Daueränderung in Tagen)	47
Tabelle 18: Niedrigwasserkennwerte zur Abflussprojektion COSMO-CLM4.8-A1B	48
Tabelle 19: Modellprojektion Unterschreitungsdauer MaxD < NM7Q2 in Tagen	49
Tabelle 20: Festlegung von Niedrigwasserklassen	50
Tabelle 21: Mittlere jährliche Niedrigwassertage Pegel Basel	53
Tabelle 22: Mittlere jährliche Niedrigwassertage Pegel Kaub	53
Tabelle 23: Mittlere jährliche Niedrigwassertage Pegel Lobith	53

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Vergleich der Auswirkungen der Niedrigwasserereignisse 2003 und 2011 basierend auf dem European Drought Impact Inventory (EDII)	62
Anlage 2: Beschreibungen der ausgewählten Niedrigwasserereignisse	63
Anlage 3: Darstellungen der Niedrigwasserdauern (MaxD)	82
Anlage 4: Validierung der Niedrigwasserklassifizierung mittels der historischen Zeitreihen	87

1. Zusammenfassung

Das Niedrigwasserereignis im Extremsommer 2003 mit ökologischen Beeinträchtigungen am Rhein sowie weitere nachfolgende moderatere Ereignisse rücken die Niedrigwasserproblematik, nach einer niedrigwasserärmeren Zeit seit Anfang der 1980iger Jahre, wieder verstärkt in die öffentliche Wahrnehmung. Durch Auswirkungen des Klimawandels können Genese und Ausmaß von Niedrigwasserereignissen zudem eine Veränderung erfahren. In der 15. Rhein-Ministerkonferenz 2013 wurde diese Thematik aufgegriffen und im IKSR-Arbeitsprogramm 2016 - 2021 verankert.

Um für die Rheinanliegerstaaten ein gemeinsames Verständnis von Niedrigwassersituationen und insbesondere für deren grenzüberschreitende Auswirkungen zu erarbeiten sowie Möglichkeiten der Zusammenarbeit zu entwickeln, wurde die Expertengruppe Niedrigwasser beauftragt, bestehende Kenntnisse zu Niedrigwasserereignissen im Rheingebiet zu inventarisieren und zu analysieren. Dabei stehen die Niedrigwasserabflüsse am Rhein im Fokus, deren Genese und Ausprägung natürlicherweise in den hydrometeorologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet festzumachen sind.

Vielfältigen Definitionen des Begriffs „Niedrigwasser“ ist gemein, dass ein bestimmter Schwellenwert hinsichtlich des Wasserstands oder des Abflusses unterschritten wird. Für die vorliegende vergleichende Bestandsaufnahme wurden demzufolge Abflüsse untersucht, deren statistische Niedrigwasserkennwerte in Relation zu damit zusammenhängenden Abflussschwellenwerten für eine Anzahl von Messpegeln längs des Rheins zu betrachten sind. Als weit verbreiteter Kennwert wurde der NM7Q, das niedrigste arithmetische Abflussmittel von 7 aufeinanderfolgenden Tagen einer Bezugsperiode (Jahr) sowie entsprechende Kennwerte für längere Perioden untersucht. Um zu vergleichbaren Schwellenwerten längs des Rheins zu kommen, wurden diese Kennwerte an 10 Untersuchungspegeln von Diepoldsau oberhalb des Bodensees bis einschließlich Lobith an der deutsch-niederländischen Grenze extremwertstatistisch ausgewertet und Schwellenwerte hinsichtlich ihrer jeweiligen Auftretenswahrscheinlichkeit (T = 2, 5, ... bis zu 100-jährlich) abgeleitet. Dem Aspekt der Andauer eines Niedrigwasserereignisses wurde durch die Analyse der Anzahl der zusammenhängenden Tage mit Abflüssen unter diesen Schwellenwerten Rechnung getragen.

Für das natürliche Niedrigwasserabflussgeschehen sind die quantitativen Anteile aus unterschiedlichen Teileinzugsgebieten des Rheins von Bedeutung. Die pegelbezogenen Messwertauswertungen längs des Rheins verdeutlichen auch für den Niedrigwasserbereich die Bedeutung des Abflussanteils aus dem Alpen- und Voralpengebiet, der selbst in den Niederlanden noch etwa zur Hälfte des mittleren Niedrigwasserabflusses beiträgt. Zudem sorgt das sich ändernde Abflussregime mit winterlichem Minimum im nivalen Bereich (bis Basel) und sommerlichem Minimum im pluvialen Bereich (unterhalb Worms) für eine gewisse Resilienz gegenüber extremen Niedrigwasserereignissen für den gesamten Rhein.

Das Niedrigwasserabflussgeschehen am Rhein wird durch Ab- und Einleitungen sowie durch die Speicherbewirtschaftung beeinflusst. Bedeutende Wasserüberleitungen finden vom Inn- ins Rheingebiet (7,8 m³/s) sowie vom Donau- ins Main-/Rheingebiet (bis zu 16 m³/s) statt. Ableitungen aus dem Rheingebiet kommen mit rund 2 m³/s dem Ticinogebiet und mit rund 3 m³/s dem Rhônegebiet zu Gute. Direkte Entnahmen aus dem Rhein sind am nördlichen Oberrhein mit bis zu 1,5 m³/s zur Grundwasserinfiltration und mit etwa 5 m³/s zur landwirtschaftlichen Bewässerung zu beziffern. Bilanzmäßig gewinnt der Rhein durch die o. g. Maßnahmen insgesamt an Abfluss. Ein noch bedeutenderer positiver Einfluss auf die Niedrigwasserabflüsse am Rhein ist in der Bewirtschaftung von Speicherräumen im alpinen und voralpinen Raum zur Energieerzeugung zu sehen. Dort werden mehr als 1,8 Milliarden m³ Speicherraum genutzt, um im Sommer anfallendes Wasser zurückzuhalten und während der am Rhein vorherrschenden Niedrigwasserzeit im Winter zur Energieerzeugung abzugeben. Die Niedrigwasserabflüsse des Rheins im Winter werden dadurch in einer Größenordnung von bis zu 100 – 120 m³/s erhöht.

Auswirkungen durch Niedrigwasser ergeben sich unmittelbar für Wasserqualität und Ökologie, nutzungsbedingte Auswirkungen betreffen die Bereiche Schifffahrt, Energieerzeugung, Industrie, Landwirtschaft, Tourismus und Freizeit sowie Sicherheit von Infrastrukturanlagen.

Am Rheinhauptstrom sind keine gravierenden langanhaltenden negativen Auswirkungen auf die Gewässergüte des Rheins bei Niedrigwasserereignissen festgestellt worden. Dies ist insbesondere den enormen Anstrengungen in der Abwasserreinigung in den vergangenen Jahrzehnten zu verdanken. Ökologische Probleme treten insbesondere bei sommerlichen Niedrigwasserereignissen, verbunden mit erhöhten Wassertemperaturen und damit einhergehenden geringen Sauerstoffgehalten auf (Fisch- und Muschelsterben in 2003). Im Rahmen der Berichtserstellung erfolgte eine Abstimmung mit den IKSR-Arbeitsgruppen „Ökologie“ (AG B) und „Gewässerqualität/Emissionen“ (AG S).

Die Binnenschifffahrt und die von ihr abhängigen Personen und Wirtschaftsbetriebe zeigen bei Niedrigwasser eine grenzüberschreitende Betroffenheit, mit der negative wirtschaftliche Folgen und Versorgungsengpässe für Energieträger und Rohstoffe verbunden sind. Für die Wasserversorgung in den Niederlanden kommt es bei Niedrigwasser durch Eindringen von Meereswasser zu einer Versalzung des Oberflächenwassers, die zur Einstellung der Trinkwasserentnahme oder zur Einschränkung der Entnahme zur landwirtschaftlichen Wasserversorgung führen kann. Die Energieerzeugung ist einerseits durch verringerte Produktion bei Wasserkraftwerken und andererseits durch Einschränkungen bei der Entnahme von Kühlwasser oder bei der Einleitung von Abwärme betroffen. Dies kann auch zu Einschränkungen für Industrie und Gewerbe führen. Bei Niedrigwasser kann es in den Niederlanden stellenweise zu Instabilitäten von Torfdeichen kommen.

Gemäß der Analyse historischer Abflussreihen waren Niedrigwasser am Rhein in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts deutlich ausgeprägter und traten mit geringeren Abflüssen und längeren Unterschreitungsdauern als in den letzten 50 Jahren auf. Hinsichtlich der Niedrigwasserabflüsse lässt sich für den Rhein von Diepoldsau bis Andernach ein signifikant zunehmender Trend für den Gesamtzeitraum von 1901 bis 2010 feststellen. Dieser Trend ist für die gesamten rund 100 Jahre nicht gleichmäßig, sondern basiert auf einem Knickpunkt um den Zeitraum 1960-1970, der überwiegend dem Einfluss der Speicherbewirtschaftung im Alpenraum zuzuschreiben ist, die ab den Jahren 1960-1970 für eine Änderung des Niedrigwasserabflusses gesorgt hat. Auch die im 20. Jahrhundert für das Rheineinzugsgebiet zunehmende Tendenz der Jahresniederschläge kann einen Anteil an dem festgestellten Trend haben. Für den Zeitraum ab 1961 bis 2010 lassen sich keine signifikanten Trends für die Niedrigwasserabflüsse detektieren. Die aktuelle Wahrnehmung von Niedrigwasserereignissen wird einerseits durch die lange Abwesenheit von bedeutenden Niedrigwasserereignissen und andererseits durch angestiegene Betroffenheiten beeinflusst.

Die Bandbreite der Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse infolge des Klimawandels reicht in vorliegenden Abflussprojektionen für den Zeitraum 2021-2050 für den Rhein von Abnahmen um 10 % bis zu Zunahmen um 10 % und lässt keine eindeutige Entwicklung erkennen. Für die ferne Zukunft (2071-2100) weisen die Abflussprojektionen für das hydrologische Sommerhalbjahr übereinstimmend deutliche Niedrigwasserabflussminderungen aus.

Für ein pessimistisches Szenario mit Niedrigwasserabnahmen um 5 bis 10 % des MNM7Q (langjähriger mittlerer Niedrigwasserabfluss an 7 aufeinanderfolgenden Tagen) für den Zeitraum 2021-2050 ergeben sich mit zunehmender Jährlichkeit größere Abnahmen von 7 bis zu 14 % für 2- bis 50-jährliche Niedrigwasserabflüsse. Mit der Abflussabnahme geht eine deutliche Verlängerung der Niedrigwasserdauer einher.

In Zukunft könnten Niedrigwasserereignisse im Sommerhalbjahr am Rhein zunehmend negative ökologische Auswirkungen haben. Bei niedrigen Abflüssen können die Wassertemperaturen im Sommer stärker ansteigen. Beispiel dafür sind die Niedrigwasserereignisse 2003 und 2006. Nach Untersuchungen der IKSR-Expertengruppe STEMP ist mit einer Zunahme der sommerlichen Wassertemperaturen am Rhein um 1,5

°C für die nahe Zukunft und über 3 °C für die ferne Zukunft zu rechnen. Dies bedeutet für die nahe Zukunft (2021-2050) unter anderem eine Verdoppelung der Tage mit Wassertemperaturen über 25 °C (ökologisch kritischer Schwellenwert) im Rhein.

Es erscheint sinnvoll, ein Niedrigwasser-Monitoring für den Rhein einzurichten, um eine einheitliche Überwachung dieser Phänomene über den gesamten Fluss zu erlauben. Aktuelle Ereignisse können direkt vergleichend eingeordnet und mögliche Veränderungen im Niedrigwasserabflussgeschehen können festgestellt werden.

Basierend auf einer eingehenden Analyse der historischen Abflussreihen wurden für den Rhein in Abstimmung mit den Internationalen Kommissionen zum Schutz der Mosel und der Saar (IKSMS) abflussbezogene Schwellenwerte zur Klassifizierung der Niedrigwassersituation in fünf Ausprägungsstufen von „normal“ bis „extrem seltenes Niedrigwasser“ abgeleitet. Die Eignung dieser Klassifizierung, die eine differenzierte Einordnung der Niedrigwasserereignisse liefert, wurde über die Anwendung auf die historischen Abflusszeitreihen validiert. Extremereignisse können klar von kleineren Ereignissen abgegrenzt werden, wobei jedoch eine ausreichende Sensitivität gegenüber kleineren Niedrigwasserereignissen gegeben ist.

Als Kernaussage lässt sich festhalten, dass die Niedrigwasserereignisse am Rhein sich in den letzten 100 Jahren nicht verschlimmert haben, sondern sich heute auf zahlreiche Nutzungen stärker auswirken (Schifffahrt, Industrie, Landwirtschaft, Energieerzeugung, usw.). Die Nachfrage nach Wasser und die sozioökonomischen Einflüsse könnten im Rheineinzugsgebiet zunehmen. Außerdem können Niedrigwasserereignisse sich negativ auf aquatische Ökosysteme auswirken, insbesondere, wenn sie zeitgleich mit höheren Wassertemperaturen auftreten. Einige Klimaprojektionen gehen für die Zukunft von häufigeren Niedrigwasserereignissen im Sommer mit erhöhter Wassertemperatur aus. All diese Punkte geben Anlass dazu, die Entwicklungen am Rhein weiter zu überwachen.

2. Veranlassung und Problemstellung

2.1 Veranlassung und Problemstellung

Auf der 15. Rhein-Ministerkonferenz 2013 wurden die Aufträge für die IKSR für die kommenden Jahre formuliert. Diese Aufträge sind im IKSR-Arbeitsprogramm 2016-2021 ausgearbeitet und konkretisiert. Zum Thema „Klimawandel und Anpassung“ wurde der Punkt Niedrigwasser aufgenommen. Dazu wurde festgehalten, dass das Thema Niedrigwasser konkreter ausgestaltet werden muss. In einem ersten Schritt sind dazu die Niedrigwasserereignisse eingehender zu analysieren. Für Niedrigwasser sind sowohl hydrologische, als auch qualitative Aspekte (Temperatur und Chemie) relevant. Die AG H wurde gebeten, die hydrologischen Aspekte der Niedrigwasserereignisse zu erfassen und näher zu analysieren. Die AG S und die AG B betrachten die qualitativen Aspekte von Niedrigwasser.

Dazu hat die AG H eine neue Expertengruppe Niedrigwasser (EG LW) eingesetzt, die am 17. Januar 2017 zum ersten Mal getagt hat.

Problemstellung

Derzeit haben die Rheinanliegerstaaten keine einheitliche Sichtweise auf Niedrigwasserereignisse, obwohl bei ihnen (extreme) Niedrigwassersituationen regelmäßig auftreten. Auch gibt es weder eine gemeinsame Vorstellung von der Relevanz grenzüberschreitender Auswirkungen von Niedrigwasser, noch von Möglichkeiten für grenzüberschreitende Zusammenarbeit beim Umgang mit Engpässen aufgrund von Niedrigwasser.

Die Einrichtung der EG LW macht dazu mit dem Erlangen eines gemeinsamen Bildes über Niedrigwasser am Rhein den Auftakt.

Die EG LW hat den Auftrag, bestehende Kenntnisse zu Niedrigwasserereignissen im gesamten Rheineinzugsgebiet zu inventarisieren, diese zu analysieren und die möglichen entsprechenden Entwicklungen auf Ebene des Rheineinzugsgebietes zu überwachen. Dabei werden mögliche Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt.

Es ist ebenfalls Aufgabe der EG LW, die sich dabei ergebenden Kenntnisse aktiv mit anderen Arbeitsgruppen (insbesondere S und B) zu teilen, um so die Auswirkungen von

Niedrigwasserereignissen auf die ökologische Funktion und die Nutzung der Gewässersysteme durch den Menschen einschätzen/beurteilen zu können.

2.2 Mandat der Expertengruppe Niedrigwasser

Die Expertengruppe Niedrigwasser (EG LW) hat ihr Mandat in nachstehende Aufgaben gefasst. Dieser Bericht dokumentiert die Umsetzung der Aktivitäten zur Realisierung dieser Aufgaben. Gleichzeitig ist dieser Bericht eines der geplanten Produkte, die die EG LW entsprechend ihrem Mandat erarbeitet hat.

1. Bestandsaufnahme der Kenntnisse zu Niedrigwasser in der IFGE Rhein

- Analyse der Niedrigwassersituation durch pegelbezogene Auswertung von Messdaten (langjährig);
- Analyse und Beschreibung ausgewählter extremer Niedrigwasserereignisse;
- Zusammenstellung von Einflüssen auf und Betroffenheiten durch Niedrigwasser;
- Betrachtungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasser durch Heranziehung der Ergebnisse der EG KLIMA / KHR-Rheinblick2050 und Übertragung der dort ermittelten Veränderungsgrößen;
- Austausch zu nationalem Niedrigwasser-Monitoring, zu Aspekten des Niedrigwassermanagements einschließlich grenzüberschreitender Aspekte

2. Aufstellung eines Niedrigwasser-Monitorings (Messnetz und Beobachtungskenngrößen)

3. Informationsaustausch mit den anderen Arbeitsgruppen AG S und AG B sowie ggf. weitere Nutzungen in Bezug auf die jeweilige spezifische Betroffenheit.

4. Erstellung eines Beitrags (Bericht) für die Antwort der AG H auf das Mandat der Rheinministerkonferenz 2013 (und im Vorfeld der nächsten Rheinministerkonferenz).
Erstellung eines Beitrags für die Empfehlung der AG H zu den Arbeitsergebnissen, zum Stand der Kenntnisse und zur Frage der Relevanz/Notwendigkeit eines IKSR-Niedrigwassermanagementplans

3. Vorliegende Untersuchungen im Rheingebiet, Nebeneinzugsgebieten und in anderen Flussgebieten

Aufgrund der Bedeutung des Rheins als einer der größten Ströme Europas sind Untersuchungen zu den Abflussverhältnissen von hohem Interesse. Eine grundlegende und umfassende Zusammenstellung zu den Abflussverhältnissen am Rhein und seiner wichtigsten Nebengewässer sowie zu den Verhältnissen im Einzugsgebiet des Rheins wurde beispielhaft in der sogenannten „Rheinmonographie“ (KHR, 1978) mit Karten-Text- und Tabellenwerk vorgelegt. Darin finden sich bereits Ausführungen zum Extremniedrigwasserjahr 1947 sowie „Betrachtungen über die Niedrigwasserperioden von 1959 und 1964“.

Eine Zusammenstellung der Einflüsse des menschlichen Handelns auf das Abflussgeschehen am Rhein ist in Buck et al. (1993) zusammengetragen. Dieser Einfluss wird insbesondere anhand der Entwicklung des Talsperrenausbaus mit einem Gesamtspeichervolumen oberhalb Basel von mehr als 1,8 Milliarden Kubikmeter (Abflussvergleichmäßigung) auf das Niedrigwassergeschehen verdeutlicht. Eine Betrachtung über die Abflussverhältnisse am Rhein und seiner Nebengewässer für das gesamte 20. Jahrhundert wurde von Belz et al. (KHR, 2007) vorgelegt. Erstmals wurde hier eine quantitativ-hydrologische Entwicklungsdynamik für das gesamte Rheingebiet über einen derartig langen einheitlichen Zeitraum analysiert und dokumentiert. Neben Entwicklungen des Abflussregimes, der Mittel- und Hochwasserverhältnisse wurden auch die Entwicklungen der Niedrigwasserverhältnisse im 20. Jahrhundert untersucht. Die Zusammenfassung für die Ergebnisse zum Niedrigwasser beschreibt diese Entwicklung und kommt zu einem klaren Ergebnis:

„Die beobachteten Niedrigwasserextreme haben sich im Laufe des 20. Jh. im Rheingebiet abgemildert. Dies gilt vor allem für den Rhein selbst und seine großen Zuflüsse; es gibt stärkere regionale Differenzierungen in den Einzugsgebieten nachgeordneter,

kleinerer Nebengewässer. Vor dem Hintergrund der oben geschilderten Zusammenhänge wird nachvollziehbar, dass diese Abmilderung dort intensiver vonstattengeht, wo die Wintersaison die eigentliche Niedrigwassersaison darstellt, mithin also im südlichen, nival geprägten Rheingebiet. In den pluvialen Mittelgebirgs- und Flachlandregionen dagegen, wo regelhaft im Spätsommer bzw. Herbst Niedrigwasserzeit besteht, entfällt angesichts wenig veränderter Niederschläge in diesen Monaten die Abmilderungstendenz. Lediglich anderweitige Einflüsse, wie am Beispiel von Überleitungszugewinnen am Main zu zeigen ist, begründen Ausnahmen von dieser Konstellation." (Belz et al., 2007)

Im Projekt KLIWAS wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland untersucht (BMVBS, 2009). KLIWAS kommt zu dem Ergebnis: *„Bezüglich der Niedrigwasserextreme bedeutet das für das südliche Rheingebiet, wo das Winterhalbjahr bei den Oberflächengewässern in der Regel die Zeit der geringsten Wasserführung ist, eine markante Abflusszunahme und damit Abmilderung. Nördlich der Mainlinie dagegen liegen im Spätsommer und Herbst die Monate mit den niedrigsten Pegelständen – hier besteht eine ungerichtete, teils auch leicht absinkende Tendenz bei den Niedrigwasserextremen. Diese geringe Verschärfung der Niedrigwasserextreme im nördlichen Rheingebiet ist allerdings so schwach ausgeprägt, dass sie statistisch nicht als signifikant belegt werden kann" (BMVBS, 2009).*

Im Projekt „Rheinblick 2050“ (Görgen et al., 2010) wurde ein umfangreiches Ensemble von Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert zur Modellierung der zukünftigen durch den Klimawandel beeinflussten Abflussverhältnisse im Rheingebiet herangezogen. Die Zusammenfassung kommt zum Thema Niedrigwasser zu folgender Schlussfolgerung: *„With respect to low flow we see no strong development in the near future; while most ensemble members show no clear tendency in summer (ranging from +/-10%), winter low flow is even projected to be alleviated (0% to +15%). For the far future, the change signal is stronger in summer, with a tendency towards decreased low flow discharges (-25% to 0%), while for winter no clear signal is discernible (bandwidths are mainly from -5% to +20% depending on discharge diagnostic and gauging station)“ (Görgen et al. 2010).*

In den Projekten „Abflussregime des Rheins“ (Belz et al., 2007) und „Rheinblick2050“ (Görgen et al., 2010) wurde deutlich, dass es an einer belastbaren Quantifizierung der Schnee- und Gletscherschmelzanteile am Gesamtabfluss des Rheins mangelte. Diese Lücke wurde durch das KHR-Projekt „Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels“ (Stahl et al., 2016) geschlossen. Analysiert und dargestellt sind die täglichen Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze für unterschiedliche Pegel am gesamten Rhein für den Zeitraum 1901 - 2006. Dadurch kann das Ausmaß dieser Einwirkungen auch auf das Niedrigwasserabflussgeschehen quantifiziert werden.

Insbesondere die Ergebnisse aus Görgen et al. (2010) wurden in einer Szenarienstudie der EG KLIMA der IKSR für das Abflussregime des Rheins berücksichtigt (IKSR, 2011).

Auf der Grundlage der in der Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins (IKSR, 2011) festgelegten Lufttemperatur- und Abflussentwicklungen hat die IKSR (Expertengruppe STEMP) 2014 erstmals einen Bericht über die Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf die Entwicklung zukünftiger Rheinwassertemperaturen in der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100) vorgelegt (IKSR, 2014). Dieser Bericht ergänzt die IKSR-Publikationen zur langjährigen Rheinwassertemperaturentwicklung im Zeitraum 1978 -2011 (IKSR, 2013a) und zu möglichen Auswirkungen dieser Änderungen auf aquatische Lebensgemeinschaften (IKSR, 2013b). Letzteres zeigt auf, dass in besonders warmen Sommern mit sehr niedrigen Abflüssen, die Wassertemperatur soweit ansteigen kann, dass negative Auswirkungen auf das aquatische Ökosystem auftreten können (IKSR, 2013b).

Außerdem hat die IKSR folgende Berichte, die sowohl Auswirkungen als auch Maßnahmen bei abgelaufenen Niedrigwasserereignissen aufzeigen, publiziert: Bericht Nr. 142 „Wärmebelastung der Gewässer im Sommer 2003 Zusammenfassung der nationalen Situationsberichte“ (IKSR, 2004), Bericht Nr. 152 „Maßnahmen bezogen auf die Wärmebelastung des Rheins in extremen Hitze- und Trockenperioden: Überblick und

Zusammenstellung der Länderberichte“ (IKSR, 2006) sowie Bericht Nr. 198 „Niedrigwasserperioden 2011 im Rheineinzugsgebiet“ (IKSR, 2012).

Im deutschen Arbeitskreis KLIWA (Klimaveränderung und Wasserwirtschaft) wurden Niedrigwasserverhältnisse und Entwicklungen für eine Vielzahl von Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz untersucht (Arbeitskreis KLIWA, 2009). In einer Zusammenarbeit der KLIWA-Partner und dem Land Hessen wurden Abflussprojektionen mit Auswertungen auch zu Niedrigwasserkenngrößen für den Rhein erarbeitet (HYDRON, 2015).

In Belz (2005) und auf der Informationsplattform Undine (www.undine.bafg.de) (BfG, 2016) sind Beschreibungen zu abgelaufenen Niedrigwasserereignissen im Rheingebiet zusammengestellt.

Für das Moselgebiet wurde in den IKSMS (Internationale Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar) ein Bericht zur Bestandsaufnahme der Niedrigwasserproblematik vorgelegt (IKSMS, 2014). Zudem widmete sich das Projekt FLOW MS 2009 bis 2013 (IKSMS, 2009-2013) dem Thema „Hoch- und Niedrigwassermanagement im Mosel- und Saareinzugsgebiet“. Ein operationelles Niedrigwasser-Monitoring wird von den IKSMS zurzeit durchgeführt und ein aktualisierter Bericht zum Thema Niedrigwasser soll 2018 verfügbar sein. Außerdem erfolgte im Rahmen der vorliegenden IKSR-Studie eine Abstimmung zwischen der IKSR und den IKSMS.

Für Bayern, das einen sehr großen Anteil am Mainneinzugsgebiet hat, wurde eine umfassende Zusammenstellung von Grundlagen bis zum Niedrigwassermanagement und Maßnahmen in unterschiedlichen Sektoren erarbeitet (BY-LfU, 2016).

Die KHR mit Unterstützung des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt (BAFU), der IKSR und der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), d.h. den drei „Rhein-Kommissionen“, hat am 20. und 21. September 2017 in Basel das internationale Symposium „Low flows in the Rhine catchment“ (Niedrigwasser im Rheineinzugsgebiet) mit 70 Teilnehmer/-innen veranstaltet. Der Schwerpunkt lag auf dem Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis und der Beschäftigung mit hydroklimatischen Prozessen und Parametern und den Auswirkungen von Niedrigwasser. So wurden beispielsweise die ersten Ergebnisse der IKSR- und IKSMS-Expertengruppen Niedrigwasser sowie Informationen der ZKR über die Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Schifffahrt präsentiert. Darüber hinaus wurden Beispiele für Überwachung, Management und abmildernde Maßnahmen gezeigt.

Auch auf diesem Symposium wurde offensichtlich, dass Niedrigwasserereignisse am Rhein sich in den letzten 100 Jahren aus hydrologischer Sicht nicht verschlimmert haben, sondern sich heute auf zahlreiche Nutzungen stärker auswirken (Schifffahrt, Industrie, Landwirtschaft, Energieerzeugung, usw.). Es wird angenommen, dass die Nachfrage nach Wasser und die sozioökonomischen Einflüsse im Rheineinzugsgebiet zunehmen. Es wird davon ausgegangen, dass in Zukunft häufigere Niedrigwasserereignisse im Sommer verbunden mit höheren Wassertemperaturen auftreten. Die Ergebnisse des Symposiums dienen als Input für die Arbeiten der drei betroffenen „Rhein-Kommissionen“. Weitere Informationen sind unter www.chr-khr.org (KHR, 2017) und www.iksr.org (unter „Veranstaltungen“) zu finden.

Aus den o.a. Projekten und Studien liegen umfangreiche Ergebnisse und methodische Vorgehensweisen vor, die auch Eingang in die vorliegende Untersuchung fanden.

Auch wenn in den meisten anderen europäischen Flusskommissionen das Thema „Hochwasser“ immer noch vorrangig ist, wird in den Bewirtschaftungsplänen gemäß WRRL, in Jahresberichten sowie in unterschiedlichen Dokumenten oder Strategien zur Klimawandelauswirkung oder -anpassung auch das Thema Niedrigwasser (oder Trockenheit/Dürre) erwähnt. Zu nennen sind z.B. die Internationale Kommission zum Schutz der Donau (IKSD) mit einem Artikel über die Trockenperiode 2003 und einem ausführlichen Bericht über Einflüsse und Auswirkungen der Dürre 2015 auf Nutzungen (basierend auf einer Umfrage der Staaten) oder die Internationale Maas-Kommission (IMK) mit einem thematischen Workshop in November 2003 an dem 60 Vertreter von Behörden, des Privatsektors, von Interessengruppen und Universitäten teilgenommen haben (Ergebnis: Einführung eines automatischen und ständigen

Informationsmeldungssystem bei Niedrigwassersituationen). Die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) widmet das 18. Magdeburger Gewässerschutzseminar dem Thema „Niedrigwasser und Ansprüche an Wassernutzungen im Einzugsgebiet der Elbe“ (18.10.- 19.10.2018 in Prag). Außerdem hat die Expertengruppe Hydrologie der IKSE kürzlich einen Bericht über die Niedrigwassersituation 2015 im Einzugsgebiet der Elbe veröffentlicht (IKSE, 2017).

Auf europäischer Ebene wird das Thema Wasserknappheit und Dürre, das auch im Hinblick auf Niedrigwasser relevant ist, hauptsächlich durch die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und deren Anforderungen zur Erreichung des guten Zustands der Gewässer (Oberflächengewässer und Grundwasser), u. a. unter Berücksichtigung der Wasserentnahmen, abgedeckt. Diese Vorgaben sollten in den nach der WRRL aufzustellenden Bewirtschaftungsplänen und dazugehörigen Maßnahmenprogramme aufgenommen werden. Die EU hat die Mitteilung „Antworten auf die Herausforderungen von Wasserknappheit und Dürre in der Europäischen Union“ (EU-Kommission, 2007) 2007 veröffentlicht. In dem „Drought Management Plan Report“ (EU-Kommission, 2008) werden detaillierte Dürre-Managementansätze ausgeführt. Hier werden u. a. obligatorische Bestandteile eines Dürre-Managements genannt: 1) ein Dürrefrühwarnsystem, 2) Dürreindikatoren und Grenzwerte für verschiedene Dürrestadien, 3) Maßnahmen, die in den verschiedenen Dürrestadien ergriffen werden müssen, um spezielle Ziele zu erreichen.

Eine Strategie (EU-Kommission, 2012), ein Expertennetzwerk zu diesem Thema (EU-Kommission, 2008) sowie das "European Drought Observatory" der Gemeinsamen Forschungsstelle (GFS)/Joint Research Centre (JRC) der EU (JRC, 2017, Cammaleri, 2017) wurden aufgestellt. Die Europäische Umweltagentur (EEA, 2009) und verschiedene Forschungsprojekte (DROUGHT-R&SPI, 2015), beschäftigen sich mit diesem Thema. Das "European Drought Impact Inventory" ist ein Inventar der Dürre und Trockenheitsauswirkungen in ganz Europa. Es beinhaltet auch Informationen zu vergangenen Niedrigwasserereignissen im Rheineinzugsgebiet (siehe auch Kap. 6.3 und Anlage 2) (DROUGHT-R&SPI, 2015; Kohn, 2017). Im Rahmen der Common Implementation Strategy (CIS) zur Unterstützung der Umsetzung der WRRL in den Mitgliedsstaaten wurden einige interessante technische Berichte oder Leitlinien erarbeitet und publiziert, wie z.B. der Dürremanagementplan (EU-Kommission, 2008) und das Dokument „Flussgebietsmanagement im Klimawandel“, das auch Angaben für Niedrigwasser beinhaltet (EU-Kommission, 2009).

Auf globaler Ebene sind unter anderem das „Manual on Low-flow Estimation and Prediction“ (WMO, 2009) und das Integrated Drought Management Programme (IDMP) (WMO - GWP, 2014) mit wertvollen Angaben zur Niedrigwasserabschätzung und -analyse sowie integriertem Dürremanagement zu nennen. In diesem Zusammenhang hat die UN im Jahr 2013 die Initiative „Capacity development to support national drought management policies“ (Schaffung allgemeiner Rahmenbedingungen zur Unterstützung nationaler Dürremanagementstrategien) initiiert (UN, 2013; BY-LfU, 2016). Im Dezember 2017 hat der UN-ECE „International Workshop on Water Scarcity: Taking action in transboundary basins and reducing health impacts“ stattgefunden (UN-ECE, 2017). Die vorläufigen Ergebnisse der EG LW wurden zu dieser Gelegenheit vorgestellt.

4. Begriffsbestimmungen, Definitionen und Vorgehensweise

Niedrigwasser an Fließgewässern entstehen durch Überlagerung von hydrologischen und meteorologischen Ereignissen. Ausschlaggebend für die Entwicklung von Niedrigwasser ist eine langandauernde Trockenperiode verbunden mit zurückgehendem grundwasserbürtigem Abfluss aus dem Einzugsgebiet. Die Ursachen von Niedrigwasser sind hauptsächlich in unterdurchschnittlichen oder gänzlich ausbleibenden Niederschlagsmengen oder hohem Rückhalt des Niederschlags als Schnee und Eis zu sehen.

Die deutsche DIN-Norm 4049 bezeichnet „Niedrigwasser“ als einen „Zustand in einem oberirdischen Gewässer, bei dem der Wasserstand oder der Durchfluss einen bestimmten Wert (Schwellenwert) erreicht oder unterschritten hat“.

Diese Definition erlaubt unterschiedliche Sichtmöglichkeiten auf das Niedrigwasser und kann bei einem Ereignis zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen führen, je nachdem ob

der Wasserstand oder der Abfluss die interessierende Größe ist und je nachdem an welcher Lokalität eine bestimmte Nutzungsform betroffen ist. Die Auswirkung ist mit einem „Schwellenwert“ verbunden, der entweder einer hydrologischen Klassifizierung entspricht, oder ab dessen Unterschreitung eine Nutzung entweder zunehmend beeinträchtigt wird (z.B. Schifffahrt), oder im Sinne eines Grenzwerts unmittelbar unterbleiben muss (z.B. Wasserableitung, Wasserentnahme). Bedeutende Betroffenheiten bei Niedrigwasser am Rhein wurden in den Ländern abgefragt und in einer Bestandsaufnahme zusammengestellt. Ebenso wurden bedeutsame anthropogene Einflüsse auf das Abfluss- und Niedrigwasserabflussgeschehen recherchiert und den jeweiligen Rheinabschnitten zugeordnet.

Niedrigwasser können durch unterschiedliche Kenngrößen und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben werden (vgl. Kap. 5). Das Eintreten geringer Wasserstände oder Abflüsse ist ein erstes offensichtliches Niedrigwassermerkmal, das durch die Andauer des Ereignisses eine weitere Ausprägung erhält. Diese Kenngrößen können für unterschiedliche Bezugszeiträume (z.B. Sommerhalbjahr) oder Messreihen ermittelt und langjährigen Mittelwerten oder Schwellenwerten gegenübergestellt werden.

Für die vorliegende vergleichende Bestandsaufnahme der Niedrigwasserverhältnisse am Rhein wurden demzufolge Abflüsse untersucht, die dann statistischen hydrologischen Niedrigwasserkennwerten als Schwellenwerten gegenübergestellt werden. So können das Ausmaß und die Entwicklung des Auftretens von Niedrigwasser über den gesamten Rheinstrang dargestellt werden. Die verwendeten Abflussschwellenwerte und Niedrigwasserkenngrößen können grundsätzlich über die Wasserstandsabflussbeziehung am Pegel in Wasserstände umgesetzt werden. Diese Wasserstände gelten aber ausschließlich für den Pegelquerschnitt und müssten für die Einordnung lokaler Beeinträchtigungen auf den jeweiligen Standort übertragen werden.

Um Niedrigwasserklassen (als Schwellenwerte) für ein Monitoring festzulegen wurden die vorliegenden Zeitreihen nach einer Homogenitätsanalyse auf einen 50-jährigen Referenzzeitraum begrenzt, der für den heutigen Zustand aussagekräftig ist. Der verfolgte Ansatz ist in Kapitel 5 erläutert. In Kapitel 7 wurde mit den festgelegten Niedrigwasserklassen das Auftreten von Niedrigwasser in den historischen Zeitreihen rückblickend analysiert und dargestellt.

5. Datengrundlage und Methoden

5.1 Messstellenauswahl und hydrologische Datengrundlage

Die Untersuchung in der EG LW konzentriert sich auf die Beschreibung und Analyse der Niedrigwasserverhältnisse längs des Rheins, wobei die Einflüsse aus den Einzugsgebieten der Nebengewässer zu berücksichtigen sind. Für die einzelnen Rheinabschnitte zwischen denen dann durch größere Nebengewässer hydrologische Veränderungen eintreten können wurden folgende Bezugspegel festgelegt, deren Werte durch das oberhalb liegende Einzugsgebiet bestimmt sind und mit Ausnahme des Pegels Diepoldsau für den Rheinabschnitt bis zum nächsten Pegel aussagekräftig sind (vgl. Abb. 1):

Pegel **Diepoldsau** am Alpenrhein oberhalb des Bodensees

Pegel **Rekingen** am Hochrhein unterhalb des Bodensees und des Zuflusses der Thur

Pegel **Basel** am Hochrhein unterhalb des Zuflusses der Aare

Pegel **Maxau** am Oberrhein mit den Zuflüssen aus Schwarzwald und Vogesen

Pegel **Worms** am Oberrhein nach dem Zufluss des Neckars

Pegel **Mainz** am Oberrhein nach dem Zufluss des Mains

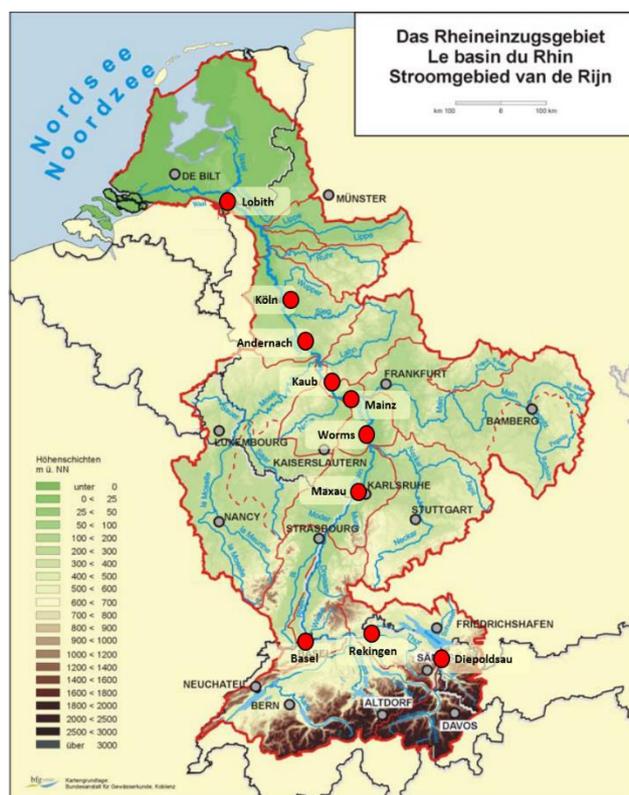
Pegel **Kaub** am Mittelrhein nach dem Zufluss der Nahe

Pegel **Andernach** am Mittelrhein nach dem Zufluss von Lahn und Mosel

Pegel **Köln** am Niederrhein nach den Zuflüssen von Ahr und Sieg

Pegel **Lobith** am Niederrhein nach den Zuflüssen von Wupper, Erft, Ruhr und Lippe bis zur deutsch-niederländischen Grenze. Flussabwärts von Lobith verteilt sich das Wasser in den Niederlanden auf 3 Rheinarme.

Bei diesen Bezugspegeln handelt es sich um hydrologische Pegel (Pegel mit Abflussauswertung), für die langjährige Abflusszeitreihen (gemessene Abflüsse oder anhand des Wasserstands berechnete Abflüsse) vorliegen (vgl. Abb. 1). Da für Niedrigwasseruntersuchungen in der Regel Tagesmittelabflüsse untersucht werden und diese aufgrund der Einzugsgebietsgrößen der Pegel am Rhein eine genügend hohe zeitliche Auflösung darstellen, wurde eine Datenbasis der Tagesmittelabflüsse von 1900 bis 2015 zusammengestellt, soweit Daten vorlagen. Für den Pegel Diepoldsau liegen Daten erst ab 1919 und für den Pegel Mainz erst ab 1931 vor.



Festlegung der Untersuchungspegel

Niedrigwasserabfluss an Rheinpegeln: ●

(1961 -2010)

Lobith	1095 m ³ /s
Köln	1028 m ³ /s
Andernach	998 m ³ /s
Kaub	851 m ³ /s
Mainz	850 m ³ /s
Worms	720 m ³ /s
Maxau	645 m ³ /s
Basel	527 m ³ /s
Rekingen	238 m ³ /s
Diepoldsau	92 m ³ /s

Abbildung 1: Lage der Untersuchungspegel am Rhein einschließlich langjähriger mittlerer Niedrigwasserabfluss an 7 aufeinanderfolgenden Tagen (MNM7Q) (verändert nach Bundesanstalt für Gewässerkunde - BfG)

5.2 Niedrigwasserkenngrößen

Das Ausmaß eines Niedrigwasserereignisses wird einerseits durch einen geringen Abfluss und andererseits durch die Länge der Andauer der geringen Abflüsse durch eine Abflussganglinie umfassend charakterisiert. Für statistische Analysen und vergleichende Untersuchungen sind aus den Abflussganglinien abgeleitete Kenngrößen erforderlich, die das Niedrigwasser beschreiben. Auf Basis der Tagesmittelabflüsse in jeweiligen Bezugszeiträumen werden der kleinste Tagesmittelabfluss aus einem zu betrachtenden Zeitraum (1901 bis heute) (**NNQ**), der kleinste Tagesmittelabfluss aus einem Bezugszeitraum (**NQ**) oder der mittlere kleinste Tagesmittelabfluss aus einer Anzahl von Jahren (**MNQ**) herangezogen. Um Störeffekte infolge von beeinflussten oder durch Messfehler behaftete einzelne Tagesmittelwerte in der Analyse einzuschränken, werden Kenngrößen aus mehreren aufeinander folgenden Tagen ermittelt. Ein gebräuchlicher Wert ist z.B. das niedrigste arithmetische Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Tagen (**NM7Q**) in einer Bezugsperiode (z.B. Jahr). Als Schwellenwert wurde in dieser Analyse **MNM7Q** für einen langen homogenen Zeitraum verwendet (vgl. Abbildung 1 und Kapitel 5.3).

Die Andauer eines Niedrigwasserereignisses wird durch die Anzahl der Tage, an denen ein (festzulegender) Schwellenwert Q_s unterschritten wird, ermittelt. Dieser

Schwellenwert kann von einer lokalen Nutzung vorgegeben oder für vergleichende Untersuchungen durch statistische hydrologische Kenngrößen definiert werden. Bei der Kenngröße Niedrigwasserdauer unterscheidet man die längste ununterbrochene Unterschreitungsdauer eines Schwellenwertes innerhalb eines Zeitabschnitts (**MaxD**) von der Summe aller Unterschreitungsdauern eines Schwellenwertes innerhalb des Zeitabschnitts (**SumD**) (DVWK, 1983).

Eine komplexere Niedrigwasserkenngröße ist als Abflussdefizit definiert (DVWK, 1983). Darunter wird die größte Abflussfehlmenge zwischen einem Schwellenwert Q_s und der Abflussganglinie innerhalb eines Zeitabschnitts (**MaxV** [m^3]) oder die Summe aller Abflussfehlmengen zwischen einem Schwellenwert und einer Abflussganglinie (**SumV** [m^3]) verstanden.

Als Bezugsdauer für die Niedrigwasserkennwerte wurde das „Wasserwirtschaftsjahr“ vom 1. April bis 31. März des Folgejahres verwendet, um bei der Ableitung von jährlichen Serien die im Spätherbst oder Winter auftretenden Niedrigwasserereignisse nicht zu unterbrechen und ggf. deren Werte nicht in zwei aufeinander folgenden Jahren zu berücksichtigen.

Hinsichtlich einer lokalen Auswirkung können Niedrigwasserkenngrößen auch auf Basis von Wasserstandswerten anstelle von Abflüssen ermittelt werden, dann sind sie allerdings nicht mit anderen Bezugspegeln (an Flüssen) vergleichbar.

5.3 Auswerte- und Analysemethoden

Zur Untersuchung der Niedrigwasserverhältnisse kamen klassische statistische Verfahren bzw. in Regelwerken veröffentlichte Methoden zur Niedrigwasseranalyse zum Ansatz (DVWK, 1983; DVWK 1992). Die statistischen Analysen und die vorangehende Reihen- und Serienbildung der Kennwerte wurde mit dem Programm HyStat des Instituts für angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik (IAWG) durchgeführt.

Nach Plausibilisierung und ggf. Korrektur der zusammengestellten Daten wurden aus allen Pegelzeitreihen **Jahresserien** der Niedrigwasserkennwerte NM_xQ ($x = 1, 3, 7, 21, 60$) ermittelt. Dazu wird für jedes Jahr der kleinste mittlere Niedrigwasserabfluss von x aufeinanderfolgenden Tagen herausgefiltert. Das arithmetische Mittel aus den Jahreskennwerten ergibt dann die Niedrigwasserkenngröße MNM_xQ ($MNQ, MNM3Q, MNM7Q, MNM21Q$ und $MNM60Q$) für die unterschiedlichen Niedrigwasserlängen an jedem Pegel (z.B. „**langjähriger mittlerer Niedrigwasserabfluss** an 7 aufeinanderfolgenden Tagen“ $MNM7Q$).

Mit den Serien der NM_xQ -Werte wurden **Sprunganalysen** durchgeführt, um festzustellen, ob sich in der Serie zu einem bestimmten Zeitpunkt Veränderungen im Verhalten der Werte ergeben. Bei den angewandten Verfahren nach Bernier und Pettit wird ein Zeitpunkt gesucht, an dem sich der statistische Charakter einer Zeitreihe verändert. Der ermittelte Bruchpunkt teilt eine Zeitreihe in zwei sich signifikant unterschiedlich verhaltende Zeitreihenabschnitte. Aufbauend auf den Ergebnissen der Sprunganalyse und der grafischen Darstellung der zeitlichen Ausprägung der Kennwerte wurde aus dem Gesamtuntersuchungsraum (1901-2015) eine Referenzperiode für den heutigen Zustand (1961-2010) abgeleitet.

Zur Untersuchung der **Niedrigwasserdauer** wurden aus den Reihen der Tagesmittelabflüsse Serien der absoluten Summen der Tage pro Jahr und der maximalen zusammenhängenden Ereignistage pro Jahr, die einen Schwellenwert Q_s unterschreiten, gebildet. Als Schwellenwert wurden die Kenngröße $MNM7Q$ und die $NM7Q$ -Werte unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Pegels gewählt, so dass alle Rheinpegel bezüglich der Andauer des Niedrigwasserereignisses unmittelbar miteinander verglichen werden können.

Mittels **Trendanalysen** wurden Zeitreihen auf das Vorhandensein von zunehmenden oder abnehmenden Trends im Niedrigwasserabflussverhalten untersucht. Geprüft wurden die Zeitreihen hinsichtlich der Signifikanz eines linearen Trends durch Anpassung einer Trendgeraden über Minimierung der Fehlerquadratsumme der Residuen. Die Signifikanzprüfung (Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %) erfolgte mit dem (nicht

parametrischen) Mann-Kendall-Test und dem t-Test des Steigungskoeffizienten der Geraden.

Um das Ausmaß der Niedrigwasserabflüsse und der Niedrigwasserdauern (Niedrigwasserzeitspannen) bezüglich deren **Eintrittswahrscheinlichkeit** einordnen zu können wurden die Daten einer extremwertstatistischen Analyse unterzogen. Für den Referenzzeitraum (1961 – 2010) wurden die Werte der Jahresserien der Niedrigwasserkennwerte einer theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung angepasst und daraus die entsprechenden Quantile für ein T-jährliches Ereignis ausgegeben (T = 2, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre). Für die Niedrigwasserkenngrößen NM_xQ , für die für jedes Jahr ein Wert vorliegt, wurde eine **klassische Wahrscheinlichkeitsanalyse** durchgeführt. Da für die Niedrigwasserdauern auch einzelne Jahreswerte ohne Unterschreitungen des Schwellenwertes vorkommen und für diese Jahre der Wert Null auftritt, können diese Serien nicht mit den üblichen hydrologischen Verteilungsfunktionen angepasst werden. Für die Wahrscheinlichkeitsanalyse der Niedrigwasserdauern wurde daher das **indirekte Verfahren** nach DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (DVWK, 1992) angewandt. Dazu werden für ein ganzes Spektrum von Schwellenwerten die jeweilige Unterschreitungsdauer in den Einzeljahren ermittelt. So kann man zu jeder Unterschreitungsdauer eine Stichprobe der zugehörigen Schwellenwerte Q_s erhalten, deren Elemente größer als Null sind. Nach erfolgter Anpassung einer Verteilungsfunktion können zunächst Schwellenwerte in Abhängigkeit der Jährlichkeit T und der Unterschreitungsdauer D ermittelt werden. Daraus ist dann als Umkehrfunktion die interessierende Größe der Unterschreitungsdauer D in Abhängigkeit vom Schwellenwert Q_s und der Jährlichkeit T ermittelbar.

6. Bestandsaufnahme

6.1 Hydrologische Verhältnisse im Rheingebiet

Das Abflussregime beschreibt das Gesamtverhalten von Fließgewässerabflüssen hinsichtlich des vieljährig gemittelten Jahresgangs sowie der kennzeichnenden Entwicklungen der extremen Hochwasser- und Niedrigwassersituationen (Belz et al., 2007). Im Rheineinzugsgebiet überlagern sich verschiedene Abflussregime (vgl. Abb. 2).

Der südliche, alpennahe Bereich (Pegel Basel) ist durch das Wechselspiel von winterlichem Schneedeckenaufbau und sommerlicher Schneeschmelze sowie durch relativ hohe Sommerniederschläge geprägt ("**Schneeregime**" oder **Nivalregime**). Dies hat zur Folge, dass **Niedrigwasserereignisse vornehmlich im Winter** und Hochwasserereignisse vornehmlich im Sommer auftreten.

Typisch für die Gewässer, die den Mittelgebirgsbereich entwässern (Neckar, Main, Nahe, Lahn, Mosel etc.; Pegel Trier) ist ein "**Regenregime**" (oder **Pluvialregime**). Hier zeigt sich eine Dominanz von Winterhoch- und **Sommerniedrigwasser**.

Durch die Überlagerung beider Regime ergibt sich stromab des Rheins eine immer **gleichmäßigere Verteilung des Abflusses über das Jahr ("kombiniertes Regime"; Pegel Köln)**.

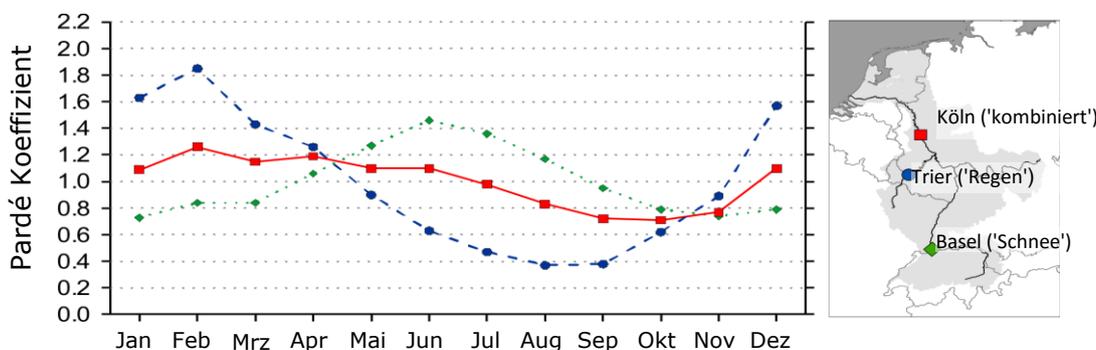


Abbildung 2: Typisches Abflussregime im Rheineinzugsgebiet nach Pardé¹; Referenzzeitraum 1961-1990 (IKSR, 2011)

¹ Pardé-Koeffizient = Verhältnis von vieljährigem Monats-Abfluss zu vieljährigem Jahresabfluss.

Für das Niedrigwassergeschehen sind die quantitativen Anteile aus unterschiedlichen Teileinzugsgebieten des Rheins von Bedeutung (s. auch 7.1). So stellen die langjährigen mittleren Niedrigwasserabflüsse aus dem Alpen- und Voralpenraum, die am Pegel Basel gemessen werden, nach Einmündung des Neckars am Pegel Worms noch nahezu drei Viertel der Niedrigwasserabflüsse bereit. Nach Einmündung des Mains werden die Niedrigwasserkennwerte am Pegel Mainz noch zu etwa zwei Drittel vom Pegel Basel dominiert während immerhin noch etwa die Hälfte des Niedrigwasserabflusses am Pegel Lobith dem Pegel Basel zuzuschreiben sind. Die Grundlast der mittleren Niedrigwasserabflüsse wird also durch den Alpen- und Voralpenraum (insbesondere durch das dortige Abflussregime und die Wirkung der Alpenrandseen) bereitgestellt. Die großen Nebengewässer erhöhen durch ihren Zufluss die Niedrigwasserkennwerte im Mittel um 12 % (Neckar) bis 18 % (Main und Mosel). Ausgeprägte Niedrigwassersituationen stellen sich demnach bei rückgehenden Abflüssen im Alpen/Voralpenraum ab September/Oktober und trockenen Wintern (oder sehr kalten Wintern mit überwiegendem Niederschlagsrückhalt in der Schneedecke) in den Einzugsgebieten mit pluvialem Regime ein.

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben die variablen Anteile aus der Schnee- und Gletscherschmelze für sommerliche Niedrigwasserereignisse am Rhein. Neben den bedeutenden Abflussanteilen, die der Schneeschmelze zuzuschreiben sind, kommt der Gletschereisschmelze bei der Stützung von Niedrigwasserphasen am Mittel- und Niederrhein bei extremen spätsommerlichen Niedrigwasserphasen eine beachtliche Bedeutung bei (Stahl et al., 2016). Diese Anteile aus Gletschereisschmelze machten bei dem Ereignis 2003 für maximale Tagesbeiträge prozentual bis zu einem Drittel am Abfluss in Basel bzw. einem Fünftel des Abflusses in Lobith aus. Bei mittleren Verhältnissen hingegen ist der Einfluss der Gletscherschmelze in Lobith gering (<2%).

6.2 Bestandsaufnahme der Beeinflussungen der Abflussverhältnisse (Entnahmen, Einleitungen, Umleitungen, Wasserrückhalt und zeitversetzte Wasserabgabe)

Anthropogene Einflüsse auf Niedrigwasser sind schwer gegenüber den natürlichen Schwankungen der hydrologischen Kenngrößen abzugrenzen. Allgemein lässt sich sagen, dass Veränderungen von Niedrigwasser direkt infolge von Speicherbewirtschaftung, Entnahmen und Einleitungen auftreten oder indirekt durch Nutzungsänderungen im Einzugsgebiet verursacht werden können (LAWA, 2007; Belz et al., 2007). In diesem Kapitel wird eine Übersicht der anthropogenen Beeinflussungen erstellt, die auf einer Erhebung bei den Staaten sowie Berichten zu abgelaufenen Niedrigwasserepisoden und Literaturlauswertungen basiert (vgl. Abb. 3). Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich auf direkte Einflüsse und lässt die indirekten Einflüsse (Flächennutzung, Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Sondernutzungen wie z.B. Bergbau, usw.), die schwer quantifizierbar sind, außen vor.

Die Abbildung 3 zeigt schematisch die hauptsächlichen Ab- und Einleitungen am Rhein und im Einzugsgebiet (Quelle: Angaben der Staaten, IKSR (intern), 2017).

Speicherbewirtschaftung

Speicherbewirtschaftung, die mit Wasserspeicherung im Zeitraum von Wasserüberschuss und Speicherentleerung im Bedarfszeitraum eine saisonale Umverteilungs- und Ausgleichsdynamik aufweist, ist ein bedeutsamer anthropogener Einfluss und trägt entscheidend dazu bei, dass sich die Abflussvariabilität trotz steigender Variabilität der Niederschläge verringert. Das ist insbesondere oberhalb Basel mit der Entwicklung des Talsperrenausbaus (mehr als 1,8 Milliarden m³ Gesamtspeichervolumen) Anfang des letzten Jahrhunderts bis in die 1960iger Jahre der Fall (vgl. Abb. 3). Außerhalb des Alpenraums zeichnet sich die Speicherbewirtschaftung durch erheblich weniger einheitliche Speicherbewirtschaftungsziele aus und tritt als Einflussgröße in ihrer Bedeutung für den Rhein zurück. Über diese Effekte hinaus bedeuten Speicherseen immer auch ausgedehnte künstliche Wasserflächen mit hoher Verdunstung und gegenüber dem früheren Zustand können durch Aufstau von künstlichen Seen und Kanalbau bzw. Flusstauhaltungen zudem größere Grundwasseranreicherungen auftreten (LAWA, 2007; Belz et al. 2007). Die Stauvolumina (d. h. Stauraum bzw.

Wasserrückhaltekapazität) der Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Die aktuelle Steuerung im alpinen Raum des Rheineinzugsgebiets führt zu einer zeitlichen Abflussumverlagerung mit der Folge, dass im sonst eher abflussarmen Winterhalbjahr die Abflüsse und insbesondere die Niedrigwasserabflüsse um ca. 120 m³/s zugenommen haben (Weingartner, 2017).

Tabelle 1: Stauvolumina der Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins (verändert nach Wildenhahn & Klaholz, 1996 in Belz et al., 2007)

Rheinabschnitt bzw. Nebenfluss	Volumen [Mio. m ³]	Summe des Volumens [Mio. m ³]
Vorderrhein	253,14	253,14
Hinterrhein	289,36	542,50
Tamina	38,50	581,00
Ill (A)	183,40	764,40
Bregenzerach	8,40	772,80
Bodensee	1,40	774,20
Thur	0,60	774,80
Hochrhein (CH)	7,26	782,06
Aare	496,95	1279,01
Reuss	153,19	1432,20
Limmat	314,86	1747,06
Hochrhein (D)	112,85	1859,91
Oberrhein	27,63	1887,54
Ill (F)	24,29	1911,83
Neckar	37,99	1949,82
Main (inkl. Speichersystem der Donau-Main-Überleituna: seit 2000. + 64 Mio. m ³)	180,00	2129,82
Nahe	14,05	2143,87
Lahn	6,63	2150,5
Moselle (F)	103,58	2254,08
Mosel (D; ohne Sauer)	50,53	2304,61
Sauer (Mosel-Nebenfluss)	71,40	2376,01
Wied	4,45	2380,46
Ahr	0,73	2381,19
Sieg	123,10	2504,29
Wupper	140,43	2644,72
Erft	51,00	2695,72
Ruhr	496,06	3191,78
Lippe	50,01	3241,79

Ab- und Einleitungen

Zu den unmittelbar auf den Gewässerabfluss einwirkenden anthropogenen Maßnahmen gehören die direkte Entnahme, Ableitung und Rückleitung von genutztem Wasser. Hierunter fällt v.a. die Nutzung des Wassers für die Trinkwassergewinnung, den Bewässerungsbedarf oder die Kühlung von Wärmekraftwerken. Durch Wasserüberleitungen in andere Einzugsgebiete kann Wasser darüber hinaus seinem angestammten Gebiet entzogen werden. Derartige Wasserüberleitungen größeren Umfangs bestehen z.B. am Neckar (Trinkwasserüberleitung aus dem Bodensee) und am Main (insbesondere Überleitung aus dem Donauegebiet seit Mitte der 1990iger Jahre über das Donau-Main-Überleitungssystem inklusive des Rhein-Main-Donau-Kanals zur Abflussstützung/Niedrigwasseraufhöhung speziell der Regnitz, die auch dem Main zu Gute kommt) (Belz et al., 2007).

Das Schema in Abbildung 3 zeigt die bedeutsamen Ab- und Einleitungen am Rhein und im Einzugsgebiet (Quelle: Angaben der Staaten, IKSR (intern), 2017/2018). Rund 2 m³/s gehen dem Einzugsgebiet durch Überleitungen in das Gebiet des Ticino sowie rund 3 m³/s aus dem Aaregebiet ins Rhônegebiet verloren. Dagegen gewinnt das Rheingebiet durch Überleitungen aus dem Innggebiet knapp 8 m³/s. Die Entnahme aus dem Bodensee (Bodenseefernwasserversorgung) wird überwiegend mit den Abwasseranteilen nach Einmündung des Neckars wieder in den Rhein zurückgeführt. Punktuelle und zeitlich

begrenzte Entnahmen von bis zu 6,3 m³/s werden in der nördlichen Oberrheinebene zur Bewässerung und zur Grundwasserinfiltration verwendet. Über den Main werden dem Rhein bis zu 15 m³/s aus dem Donaugebiet (Wasser aus Altmühl und Donau, gespeicherte Hochwässer der Altmühl) zugeführt, die der Abflussstützung² bzw. Niedrigwasseraufhöhung der Rednitz, der Regnitz und des Mains dienen (vgl. Abb. 4). Des Weiteren werden aus Gewinnungsanlagen im Lech-Mündungsgebiet zusätzlich bis zu 0,9 m³/s als Trinkwasser ins das Main-Einzugsgebiet gefördert. Flussabwärts von Mainz bis Lobith gibt es keine bedeutenden Ab- und (hier haben die Niederländer oder gesagt) Einleitungen. Unterhalb von Lobith beginnt das Rheindelta. Der Fluss teilt sich schnell in drei Arme. Am Pannerdensche Kop teilt der Rhein sich in die Waal und den Pannerdensch Kanaal. Der Pannerdensch Kanaal geht nach einigen Kilometern in den niederländischen Niederrhein über, bei Arnhem zweigt die IJssel von diesem Fluss ab. Der niederländische Niederrhein und die Waal münden schließlich in die Nordsee. Die IJssel mündet in das IJsselmeer. Überschüssiges Wasser aus dem IJsselmeer wird über Schleusen in das Wattenmeer geleitet.

Alle vorgenannten Wasserströme, insbesondere die Entnahme zur Beregnung und die Wasserüberleitung aus dem Donau- in das Rheingebiet, treten nicht zeitgleich und gleichmäßig auf, dennoch ist aus der Zusammenstellung zu erkennen, dass eine Bilanz für den Rhein insgesamt positiv ausfällt. Diese positive Bilanz ist noch durch die zahlenmäßig weitaus bedeutsamere Stützung der winterlichen Niedrigwasserabflüsse durch die Speicherbewirtschaftung im Alpenraum (s.o.) zu ergänzen.

² Anmerkung: Die Donau-Main-Überleitung erfolgt nicht nur zu Niedrigwasserzeiten, sondern – mit variablen Abgaben – über das gesamte Jahr. Ziel der Überleitung ist u. a., möglichen Nachteilen für die wirtschaftliche Entwicklung in Franken zu begegnen (ausreichende Wasserbereitstellung, dadurch Stützung der Gewässergüte).

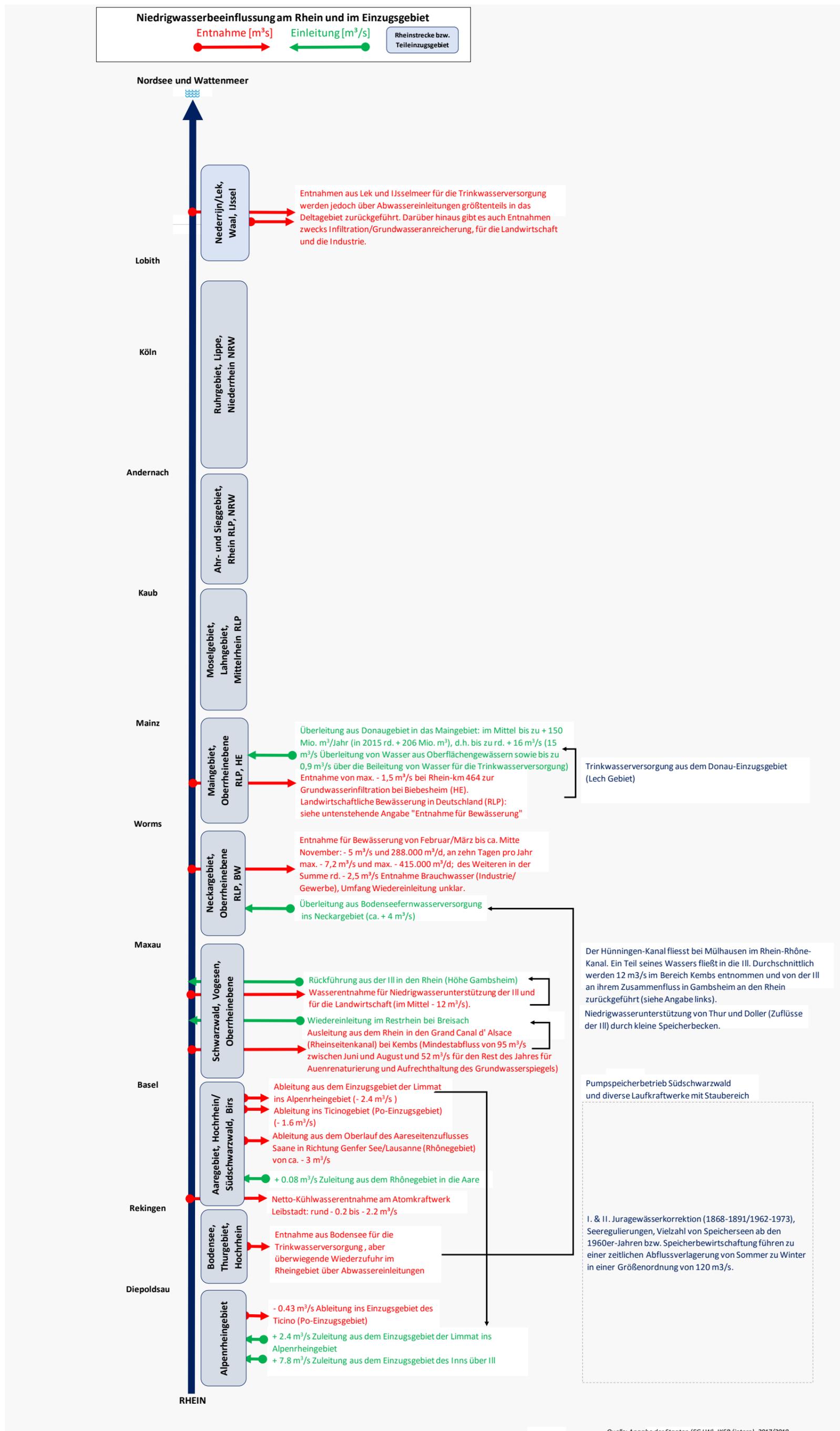


Abbildung 3: Bedeutsame Ab- und Einleitungen am Rhein und im Einzugsgebiet



Abbildung 4: Überleitungssystem Donau-Main (StMUV, 2011)

6.3 Bestandsaufnahme der Betroffenheiten durch Niedrigwasser am Rhein

Niedrige Wasserstände und Abflüsse sind ebenso wie Hochwasser natürliche Ereignisse, die nicht vermeidbar sind. Wenn Niedrigwasser von einer starken Erwärmung der Gewässer begleitet wird, kann es aufgrund des verminderten Sauerstofftransportes (niedriger Abfluss in Verbindung mit geringerer Sauerstoffkonzentration infolge von Temperaturanstieg) zu negativen Auswirkungen auf das Ökosystem kommen. Niedrige Abflüsse bzw. Wasserstände können die Schifffahrt auf dem Rhein und die Leistung der Wasserkraftwerke stark einschränken. Die Auswirkungen von Niedrigwasser können wie folgt unterschieden werden:

- Auswirkungen auf die Wasserqualität und die Ökologie
- Nutzungsbezogene Auswirkungen

Abbildung 5 zeigt zusammenfassend unterschiedliche Nutzungen die durch Niedrigwasser qualitativ oder quantitativ beeinflusst oder beeinträchtigt sein können.



Abbildung 5: Vereinfachte Wirkbeziehungen von Niedrigwasser auf die Wassernutzungen (Arbeitskreis KLIWA, 2017)

Auch wenn die Betroffenheit regional und jahreszeitlich unterschiedlich sein können, wurde im Rahmen der IKSR eine Reihe von Auswirkungen von Niedrigwasser erhoben (Quelle: Angaben der Staaten, IKSR (intern), 2017), die z.T. auch in den Angaben zu vergangenen Niedrigwasserereignissen (insb. 2003 und 2011) (IKSR, 2004, 2006, 2012) verzeichnet worden sind. Die Zusammenfassung aus dem European Drought Impact Inventory (EDII) von Niedrigwasserauswirkungen 2003 und 2011 im Rheineinzugsgebiet gibt die von den Staaten im Rahmen der IKSR gelieferten Informationen über beide Ereignisse (Ausmaß, Effekte, Betroffenheiten und Auswirkungen ...) wieder (Kohn, 2017) (vgl. Anlage 1). Unter anderem stellt man fest, dass beim Ereignis 2003 die Auswirkungen ausgeprägter und weitreichender waren (auch im Einzugsgebiet) als 2011, da sie sich hierbei auf den Rhein beschränkt haben (vgl. Anlage 1).

Grenzüberschreitend relevant für den Rhein als internationaler Korridor sind insbesondere das Abkommen zur Wasserentnahme aus dem Bodensee für die Trinkwasserversorgung, die generellen Auswirkungen des Rheinabflusses für Unterlieger sowie die Schifffahrt.

6.3.1 Auswirkungen auf die Wasserqualität und die Ökologie

Wasserqualität

Bei sommerlichem Niedrigwasser sind verschiedene gewässerökologische Aspekte relevant. Die Temperatur ist für die Gewässerqualität ein wichtiger Parameter: Sie ist für die Geschwindigkeit aller chemischen und biochemischen Prozesse bestimmend, sie beeinflusst die Lösungskapazität von Substanzen und spielt für das chemisch-physikalische Gleichgewicht im Wasser sowie für Selbstreinigungsprozesse eine wichtige Rolle (IKSR, 2013, 2015).

Mit zunehmender Wassertemperatur nimmt die Sauerstofflöslichkeit ab. Gleichzeitig nimmt der Sauerstoffbedarf für chemische und biologische Prozesse zu. Diese beiden gegensätzlichen Wirkungen können während Niedrigwasserperioden zu Krisen führen. Bei niedrigerem Abfluss steigen infolge der geringeren Verdünnung die Konzentrationen von (gereinigten) abwasserbürtigen Stoffen aus Punktquellen (biologisch abbaubare Substanzen, Nähr- und Schadstoffe sowie Salze und Krankheitserreger) an. Zu Zeiten meteorologischer Trockenheit oder bei Speicherung der Niederschläge im festen Zustand kommt hingegen der fehlende Oberflächenabfluss in geringeren diffusen Einträgen zum Ausdruck. Am **Hauptstrom** sind gravierende langanhaltende negative Auswirkungen auf die Gewässergüte des Rheins nach Niedrigwasserereignissen nicht festgestellt worden. Allgemein ist die stoffliche Belastung durch den in den letzten Jahrzehnten erfolgten konsequenten Ausbau der Abwasserreinigung bei Kommunen und Industrie insgesamt erheblich reduziert worden. Kritische Schadstoff- oder Sauerstoffkonzentrationen wurden in aller Regel nicht erreicht. Diese grundsätzlich positive Bilanz wurde auch z. B. 2003 dadurch unterstützt, dass durch die fehlenden Niederschläge weder diffuse Einträge aus der Fläche (u. a. Erosion und Abschwemmung), noch Einträge aus Mischwasserentlastungsanlagen erfolgten. Neben Effekten wie Konzentrationszunahme, die durch fehlende Verdünnung verursacht werden, führten 2003, zumindest am Hochrhein, Erwärmung und intensive Sonneneinstrahlung zu einer Massenentwicklung von Algen, deren Photosyntheseaktivität Sauerstoffübersättigungen und auffällige Kalkausscheidungen (biogene Entkalkung) zur Folge hatten.

Stauregulierte Nebenflüsse wärmen sich wegen den geringen Fließgeschwindigkeiten stärker auf, so dass die Restbelastungen aus Abwassereinleitungen zu angespannten Sauerstoffverhältnissen führen können. Gefährdet sind in erster Linie die Bereiche direkt unterhalb von Abwassereinleitungen. Dies zeigte sich 2003, als es beispielsweise lokal zu Fischsterben (siehe unten) kam.

Bei anhaltenden Niedrigwasserperioden steigt die Gefahr, dass salzhaltiges Meerwasser aus dem Grundwasser in das Oberflächenwasser eindringt und, dass in den Poldern im Westen der Niederlande es zu Bodenabsenkungen kommt. Die Versalzung kann auch eine ernstzunehmende Gefahr für die Wasserqualität und Ökologie darstellen.

Ökologie

Niedrigwasser, die vom Menschen als empfindliche Störungen und teilweise als besorgniserregende Ereignisse wahrgenommen werden, kommen das ganze Jahr zum größten Teil natürlicherweise vor und sind charakteristisch und wichtig für das Ökosystem Fließgewässer. Viele Arten haben spezifische Überlebens- und Anpassungsstrategien dafür entwickelt. Dennoch können weniger mobile Arten kleiner Gewässerläufe bei Austrocknungen Schaden nehmen (z. B. Bach- oder Perlmuschelbestände). Im Rhein können ökologisch wertvolle Buhnenfelder und flache Bereiche jenseits der Fahrrinne bei Niedrigwasser trocken fallen oder die Mündungsbereiche von Nebengewässern abgekoppelt werden. Dies führt zu Einschränkungen in der Erreichbarkeit wichtiger Lebensraumstrukturen (beschattete oder Strömungsschutz bietende Ufer) oder beim Aufstieg wandernder Fischarten in die Nebengewässer.

In der ökologischen Wirkung relevanter dürfte jedoch die Wassertemperatur sein. Diesbezüglich sind die Reaktionsmöglichkeiten stark eingeschränkt. Die Temperatur ist für Tiere und Pflanzen einer der wichtigsten Umweltfaktoren, denn sie steuert u. a. Reproduktion, Wachstum, Entwicklung und Wanderung. Eine länger andauernde oder sogar dauerhafte Erhöhung der Wassertemperatur wirkt sich besonders auf wechselwarme Organismen wie Fische und Makroinvertebraten aus, die ihre Körpertemperatur nicht selbst regulieren können, sondern sich stetig ihrer Umgebung anpassen (IKSR, 2013, 2015, 2017). Bei hohen Temperaturen haben sie einen gesteigerten Energie- bzw. Sauerstoffbedarf bei gleichzeitig sinkendem O₂-Angebot im Wasser. Dabei kann der Stoffwechsel so stark angeheizt werden, dass die Tiere nicht mehr genügend Nahrung finden und beginnen ihre Fettreserven aufzuzehren, um den Körper mit Energie zu versorgen. Dies führt zu Stress und zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Krankheiten. Aufgrund erhöhter Wassertemperaturen in Verbindung mit Einschränkungen des Lebensraumes sind 2003 insbesondere Fisch- und Muschelsterben berichtet worden (es wurde ein Sterben der aus Asien eingewanderten Korbchenmuschel vom Oberrhein bis nach Nordrhein-Westfalen beobachtet).

In der Schweiz gab es 2003 ein Massensterben der Äschen im Hochrhein und im Bodensee-Untersee. Aus kleineren Fließgewässern wurden zahlreiche Fische umgesiedelt. In der Schweiz und in Deutschland verendeten Aale in größerem Umfang im Rhein (Rotaalseuche). In Frankreich wurden 2003, trotz lokaler Fischsterben, keine weitverbreitenden negativen Effekte auf die Fischfauna festgestellt. In den Niederlanden kam es in den Gewässern zu einem sehr starken Wachstum von Algen (u.a. Blaualgen) und Wasserpflanzen (Verkrautung) sowie Botulismustötungen (bei Wasservögeln). Seit einigen Jahren, wird im Rhein und seinen Zuflüssen durch anthropogene Nutzung verstärkt eine erhebliche Veränderung in den Lebensgemeinschaften durch einwandernde Neobiota beobachtet. Höhere Wassertemperaturen (vor allem im Winter) können bei einigen Arten die Ansiedlung erleichtern oder einen Konkurrenzvorteil bieten, durch den die Größe der entsprechenden Population anwachsen kann. Es ist anzunehmen, dass die Zunahmen dieser Arten in der Regel eine Verschlechterung des ökologischen Zustandes nach WRRL bewirken.

Allgemein sind im gesamten Rheingebiet aber, dank der verbesserten Gewässerqualität und der Widerstandsfähigkeit der Flora und Fauna, bei vergangenen Niedrigwasserereignissen massive und bleibende ökologische Auswirkungen bzw. Schäden ausgeblieben.

6.3.2 Auswirkungen auf die Nutzung

Die ökonomischen Schäden der mit Niedrigwasserereignissen verbundenen Nutzungseinschränkungen sind zum Teil nur schwer quantifizierbar. Je nach Dauer, räumlicher Ausdehnung und den regionalen Gegebenheiten können jedoch negative Auswirkungen für die Nutzungsfunktionen und erhebliche volkswirtschaftliche Schäden ausgelöst werden (LAWA, 2007). Das Rheineinzugsgebiet wird intensiv genutzt und viele Akteure und Nutzungsfunktionen sind von ausgeprägtem Niedrigwasser betroffen, u.a. Wasserversorgung, Schifffahrt, Energiegewinnung, Industrie, Landwirtschaft, Erholung und Sicherheit.

Wasserversorgung

Lokal können Trockenperioden Verbrauchseinschränkungen und Versorgungsengpässe bei der Trinkwasserversorgung verursachen. Dies ist insbesondere dort der Fall, wo die Wasserversorgung hauptsächlich aus Fließgewässern, oder oberflächlichen und/oder empfindlichen Grundwasservorkommen erfolgt. In manchen Gebieten kann es abhängig von der Ausprägung der Niedrigwassersituation zeitweise Einschränkungen für die Entnahme von Oberflächen- und Grundwasser geben. Einschränkungen gelten u.a. für die Bewässerung von Gärten und Parks sowie in der Landwirtschaft und die Entnahmen und Einleitungen bestimmter Kraftwerke und Industriebetriebe. In den Niederlanden tritt eine Versalzung des Oberflächenwassers durch das Eindringen von Meereswasser auf, das zur Einstellung der Trinkwasserentnahme oder der Entnahme zur landwirtschaftlichen Wasserversorgung führen kann. Der Süßwasserabfluss des Gewässers wirkt normalerweise als natürliche Barriere gegen das Eindringen von Salzwasser. Bei Niedrigwasser reicht die Menge des Süßwassers nicht immer aus um dieses Eindringen des Salzwassers zu verhindern, weshalb das Salzwasser weiter östlich und landeinwärts vordringt. Hierbei können kritische Nutzungen, wie u.a. die Trinkwasserentnahme, unter Druck geraten (Beijk, 2017).

Schifffahrt

Die Schifffahrt (Binnenschifffahrt auf dem Rhein und seiner Nebenflüsse) kann als einer der hauptbetroffenen grenzüberschreitenden Nutzungen bei Niedrigwasser bezeichnet werden. Sie leidet bei niedrigen Wasserständen unter starken Einschränkungen, in frei fließenden Flüssen zum Beispiel durch verringerte Fahrrinntiefen und eingeengte Fahrrinnen. Dies betrifft in geringerem Umfang auch die gestauten Nebenflüsse und Kanäle und kann dort dazu führen, dass zum Beispiel der Schleusenbetrieb bei extrem niedrigen Abflüssen nicht mehr uneingeschränkt sichergestellt werden kann. Die Folge ist, dass die Binnenschifffahrt weniger Ladung transportieren kann, was wiederum zu mehreren negativen wirtschaftlichen Folgen führt. Zum einen sinkt das gesamte Transportaufkommen der Binnenschifffahrt, und es kommt zu Verschiebungen zwischen den unterschiedlichen Transportmodalitäten (der Marktanteil der Schifffahrt nimmt infolge des Konkurrenznachteils ab). Auch die Kosten für die Schifffahrtsunternehmen erhöhen sich, wenn die Flotte nicht mehr optimal eingesetzt werden kann (insbesondere die größeren Schiffe). Somit wird eine wesentliche Stärke der Binnenschifffahrt – der wirtschaftliche Vorteil großer Ladekapazitäten – bei Niedrigwasser größtenteils außer Kraft gesetzt.

Neben der Frachtschifffahrt kann ebenso der Betrieb von Fahrgastschiffen (siehe auch unter „Tourismus, Freizeit, Erholung“) und Fähren betroffen sein, die unter Umständen aufgrund des niedrigen Wasserstandes auch ihre Anlegestellen nicht mehr erreichen können.

Energieerzeugung

Durch den geringen Abfluss kann zwangsläufig weniger Energie an Flusswasserkraftwerken erzeugt werden. Da Wärmeeinleitungen (aus Kühl- und Brauchwasser) in die Gewässer Beschränkungen unterliegen, muss teilweise die Produktion in Kraftwerken (Kern-, Kohlekraftwerke, etc.) gedrosselt werden. Sondergenehmigungen ermöglichen zeitweise eine höhere Einleitungstemperatur und verursachen damit höhere Mischtemperaturen im Gewässer als im Normalbetrieb.

Industrie

Niedrigwasser kann auch Konsequenzen für die verarbeitende Industrie und Gewerbe haben, die zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden führen können.

Bei länger anhaltenden Niedrigwasserperioden kann es aufgrund der eingeschränkten Schifffahrt (siehe dazu unter „Schifffahrt“) zu Engpässen in der Versorgung beispielsweise mit Kohle, flüssigen Mineralölprodukten (z. B. Heizöl und Kraftstoffe), Erzen und landwirtschaftlichen Rohstoffen kommen.

Landwirtschaft

Geringe Niederschläge und starke Verdunstung – verursacht durch hohe Temperaturen – können sich in der Landwirtschaft negativ auswirken. 2003 gab es z.B. regionale Einschränkungen oder Verbote von Wasserentnahmen aus kleineren Gewässern, die zu vereinzelt Konflikten zwischen Behörden und Landwirten führten.

Neben bedeutenden Produktions- und Ertragseinbußen im Pflanzenbau (z. B. Anbau von Futtermitteln, Getreide, Gemüse) können auch günstige Bedingungen für den Weinbau (Qualität der Weine bei reduzierter Menge) auftreten.

2011 drohte die Versalzung des Oberflächenwassers im Westen der Niederlande (hohe Chloridgehalte infolge Meerwasserintrusion) zu geringeren Ernteerträgen zu führen und es musste als Gegenmaßnahme der Wasserstand in den Poldern gestützt werden.

Tourismus, Freizeit, Erholung

In den Bereichen Tourismus, Freizeit und Erholung ergeben sich sowohl negative, als auch positive Effekte von Trockenperioden und Niedrigwasser. Ökologische Konsequenzen für den Fischbestand (vgl. Kap. 6.3.1) beeinträchtigen die Erträge der Sport- und Freizeitangler sowie der berufsmäßig betriebenen Fischereiwirtschaft. Außerdem kann im Einzelfall der Tourismus auch die Speicherbewirtschaftung einschränken. Zum Beispiel kann in Bayern die Altmühl-Überleitung (vgl. Abb. 4) nur so lange bedient werden, wie noch genug Wasser in Altmühl-, Brombach- und Rothsee für touristische Zwecke enthalten ist.

Für den Betrieb von Privatbooten und Fahrgastschiffen gelten die im Abschnitt Schifffahrt genannten Einschränkungen. Andererseits kann es auch zu einer (lokalen) Zunahme des Tourismus führen, wenn eine Niedrigwasserperiode mit warmem Wetter verbunden ist. 2003 war der Ausflugsverkehr auf dem Hochrhein/Untersee eingeschränkt, dennoch gab es insgesamt aufgrund des schönen Wetters mehr Passagiere. In Deutschland waren Langstrecken-Fahrgastschiffe phasenweise nicht einsetzbar, hingegen verbuchte die Kurzstrecken-Personenschifffahrt eine Steigerung der Fahrgastzahlen. Trocken gefallene Flüsse und Talsperren können auch eine anziehende Wirkung auf die Menschen ausüben („Niedrigwassertourismus“, LAWA, 2007). Allerdings kann die Badewasserqualität, insbesondere kleinerer Gewässer, durch hohe Konzentration an Schadstoffen sowie Entwicklung von Blaualgen (Cyanobakterien) beeinträchtigt werden und lokal eine gesundheitliche Gefährdung der Bevölkerung darstellen (Baden und andere Freizeitgestaltung am Wasser).

Sicherheit (insb. von Infrastrukturen und (Hochwasserschutz-)Anlagen)

Insbesondere in den Niederlanden bildet die Instabilität der (Torf-)Deiche (Hochwasserschutzanlagen) bei niedrigen Wasserständen ein Problem. Torfdeiche gibt es auf insgesamt 3500 Km in den Niederlanden, vor allem im Utrechts Hollandse Veenweidegebiet, Noord-Holland, Friesland und Groningen. Im August 2003 sind z.B. an zwei Stellen die Torfdeiche abgesackt, und Wasser ist in tiefgelegenen Poldern eingeflossen (dies führte zu bis zu 40 cm Wasserhöhe in den Wohnungen bei Wilnis). Um Bodenabsenkungen und Versalzung in den Niederlanden zu vorzukommen, musste auch 2011 der Wasserstand in den Poldern gehalten werden.

In Deutschland kamen 2011 wegen des Niedrigwassers einzelne Bomben aus dem zweiten Weltkrieg am Rhein an die Oberfläche, wurden geborgen und entschärft.

6.4 Nationales Niedrigwassermanagement

Die Angaben in diesem Kapitel basieren auf einer Erhebung bei den Staaten des Rheineinzugsgebiets sowie auf Berichten über abgelaufene Ereignisse (IKSR (intern), 2017). Unterschiedliche Maßnahmen und Werkzeugkästen sind in den Staaten verfügbar. Ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement umfasst sowohl Vorsorgemaßnahmen als auch operative Maßnahmen (vgl. Abb. 6) (BY-LfU, 2016; Wahliß, 2017). Die Konzepte und Maßnahmen der Niedrigwasservorsorge sollen die Entstehung und die Wirkungen von Niedrigwasser im Vorfeld und langfristig minimieren. Das operative Niedrigwassermanagement zielt auf kurzfristig wirkende Maßnahmen, die in akuten Niedrigwassersituationen ergriffen werden können, ab. Im Wesentlichen sind dabei 4 Bereiche zu beachten: Analyse von vergangenen und zukünftigen Niedrigwasserereignissen, Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Wassernutzungen, Vorsorge/ Schutz gegenüber künftigen Ereignissen, Maßnahmen sowie der Umgang mit einem konkreten Niedrigwasserereignis.

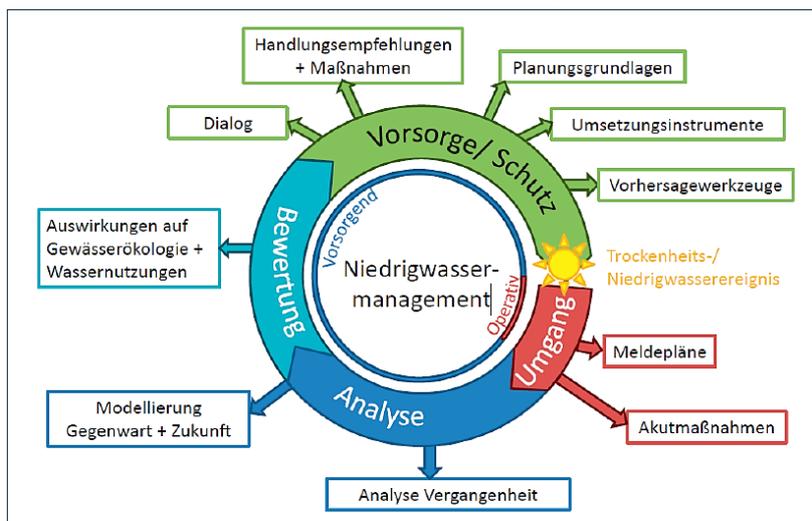


Abbildung 6: Zyklus des Niedrigwassermanagements und damit zusammenhängende Handlungsfelder (BY-LfU, 2016; Wahliß, 2017)

6.4.1 Überwachung, Vorhersage, Information und Warnung

Niedrigwassermanagement benötigt eine umfassende Informationsbasis. Diese beginnt mit Monitoringdaten und reicht über Informations- und Warndienste zur Einschätzung der aktuellen Lage bis hin zu Vorhersagen der weiteren Entwicklung.

Überwachung, Modelle und Vorhersage: Die regionale und nationale Niedrigwasserüberwachung erfolgt grundsätzlich über ein Netz aus Pegelstellen, an denen der Wasserstand gemessen wird, der dann in einen Abflusswert umgerechnet wird. Die zwei hydrologischen Parameter Wasserstand und Abfluss werden in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten (Schweiz), 10 Minuten (Niederlande) oder bis zu 15 Minuten (Deutschland, Luxemburg) erfasst. Als nicht-hydrologische Parameter werden abhängig von der Messstelle u.a. Wassertemperatur und Wasserqualität in unterschiedlichen Zeitaufösungen gemessen.

Ein Großteil der Staaten veröffentlicht für die hochwasserrelevanten Pegel auch außerhalb von Hochwasserperioden täglich mindestens eine Wasserstandsvorhersage, womit automatisch auch Niedrigwassersituationen eingeschlossen sind (siehe Details im Kästchen unten). Wasserhaushaltsmodelle erzeugen für die Gewässer Abfluss- und in Deutschland teilweise auch Wassertemperaturvorhersagen.

Es gibt unterschiedliche Modelle in der Schweiz. In Deutschland wird LARSIM in RLP, BW, HE und WAVOS von der BfG eingesetzt. BY nutzt am Main nicht LARSIM, sondern SOBEK. Bei einigen Zentralen in Frankreich werden hierfür Hochwassermodelle genutzt sowie in Luxemburg und den Niederlanden Wetter- und Wasserhaushaltsmodelle. In den Niederlanden werden Vorhersagen täglich erzeugt und publiziert, bei bedeutenden Niedrigwasserereignissen gibt es einen wöchentlichen Bericht.

Für niedrige Grundwasserstände bestehen lediglich konzeptuelle Methoden und keine operationelle Modellierung. Bei der Überwachung in Bayern (Niedrigwasserinformationsdienst – NID; siehe Details unten) wird zwischen oberflächennahen und tiefen Messstellen unterschieden. Die oberflächennahen Messstellen zeigen auch kurzfristige Schwankungen an und geben Hinweise auf den Wasservorrat, der in Trockenzeiten Bäche und Flüsse speist. Die tiefen Messstellen zeigen eher langfristige Schwankungen auf.

Auf EU-Ebene ist hier das European Drought Observatory (EDO) zu nennen (Cammalleri/JRC, 2017). Die EDO-Seiten enthalten trockenheitsrelevante Informationen wie z.B. Karten von Indikatoren, die aus verschiedenen Datenquellen abgeleitet wurden (z.B. Niederschlagsmessungen, Satellitenmessungen, modellierte Bodenfeuchte). Verschiedene Tools ermöglichen die Analyse der Informationen und "Drought News" geben einen Überblick über die Situation bei drohenden Dürren.

Obwohl langzeitliche Vorhersagen oder Prognosen von Relevanz für unterschiedliche Nutzungen wären (z.B. Schifffahrt), stellen sie immer noch eine hohe Herausforderung dar. Im Rheineinzugsgebiet befinden sich solche Vorhaben immer noch in einer Testphase und sind aus technischer Sicht begrenzt. Für das Niedrigwassermanagement sind längere Prognosezeiträume als für Überschwemmungen erforderlich. Im Rahmen des gemeinsamen KHR-Symposiums wurde das Thema zwischen Wissenschaftlern und Nutzern diskutiert (KHR, 2017). Interessante Beiträge wurden präsentiert wie ein statistischer Ansatz zur monatlichen und saisonalen Prognose von Rhein-(Niedrig)wasserständen auf der Grundlage hydrologischer, atmosphärischer und ozeanischer Daten (angewandt durch die BfG um monatliche bis saisonale Prognoseprodukte für die deutschen Wasserstraßen zu entwickeln) (Ionita-Scholz, 2017). Weiterhin wurde das seit 2015 in Betrieb befindliche „Hydrological Ensemble Prediction System“ (HEPS) für monatliche Ensemblesniedrigwasservorhersagen präsentiert. In der Schweiz sind die Bedingungen für langfristige Prognosen aufgrund der Topographie und kleiner Einzugsgebiete schwierig, sodass hierzu bemerkt wurde, dass „Prognosen, die über 32 Tage hinausgehen, sich einem Glücksspiel annähern“ (Zappa et al., 2017).

Warnmeldungen und Niedrigwasserberichte (auch zur Bewusstseinsbildung und Vorsorge):

In Deutschland wird diese Aufgabe länderspezifisch wahrgenommen. Beispiele dafür sind der bayerische „Niedrigwasserinformationsdienst“ - für frühzeitige Reaktionen in der Wasserwirtschaft und für die Öffentlichkeit verfügbar – sowie der Ökologische Alarmplan Main (AMÖ), um in Niedrigwassersituationen kurzfristig zu warnen und schädliche Folgen für die Gewässerökologie möglichst zu verhindern (BY-LfU, 2016; Regierung von Unterfranken, 2012; Wahliß, 2017).

Zu vergangenen (ausgeprägten) Ereignissen gibt es i. d. R. Schwerpunkte in Gewässerkundlichen Jahresberichten (BfG, Bundesländer).

In Luxemburg werden Warnmeldungen ausschließlich durch Pressemitteilungen und nationale Ereignisberichte publiziert. Es gibt dort keine Warnstufen, sondern Handlungsempfehlungen nach Experteneinschätzung.

In Frankreich werden Alarm- und Warnschwellen für die Region Grand Est (Rhein-Maas-Einzugsgebiet) für die Einstufung der hydrologischen Lage festgelegt. Erforderlichenfalls werden präfektorale Erlasse zur Einschränkung oder Aussetzung der Wassernutzungen verabschiedet. Die Behörden veröffentlichen regelmäßig Berichte, die die Erreichung verschiedener Schwellenwerte wiedergeben. Zudem gibt es auf nationaler französischer Ebene eine Internetseite für die Öffentlichkeit, die alle geltenden Einschränkungs- oder Aussetzungsmaßnahmen zusammenfasst (Propluvia).

In der Schweiz ist eine Warnung auf nationaler Ebene noch in Entwicklung, aber in den zweimal wöchentlich veröffentlichten sogenannten Hydrologischen Bulletins wird auf

eventuelle Niedrigwassersituationen eingegangen. Zudem werden Informationen zum Niedrigwasser über kantonale Seiten und www.drought.ch publiziert.

In den Niederlanden erfolgen die Berichterstattung und die Warnmeldung durch die Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (Nationale Koordinierungskommission für Wasserverteilung, LCW) und es gibt nationale und regionale Berichte über Trockenheit sowie tägliche Wasserstandsmeldungen für die Schifffahrt.

Niedrigwasservorhersage und -berichte in den unterschiedlichen Staaten (Quelle: Bestandsaufnahme und Angaben der Hochwasservorhersagezentralen am Rhein; verändert nach IKSR, 2016 (intern)):

- In der Schweiz werden Abflussvorhersagen auf der Internetseite des BAFUs publiziert (siehe [hier](#)), spezielle Trockenheitsvorhersagen auf einer spezifischen Seite www.drought.ch (Informationsplattform zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz).
- Frankreich verwendet gelegentlich Niedrigwasservorhersagemodelle. Während des Zeitraums eines drohenden Niedrigwassers (normalerweise von Mai bis einschl. September) überwacht die DREAL Grand Est wöchentlich die hydrologische Lage an den Gewässern. Bei Überschreitung einer Abfluss-Mindestschwelle sendet die DREAL Grand Est Lageberichte an unterschiedliche Akteure. Weiterhin betreibt EDF seine eigenen Niedrigwasservorhersagen um die Sicherheit von Anlagen zu gewährleisten, Umweltstandards einzuhalten, das Wasserressourcenmanagement zu verbessern und die Produktion von Kraftwerken zu optimieren (Puygrenier und Antheaume, 2017).
- Deutschland:
 - BfG / Wasserschifffahrtsverwaltung (WSV): für den Rhein flussabwärts von Worms: tägliche Vorhersage der Wasserstände bei Niedrigwasser. Basiert auf dem Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS (WAVOS dient sowohl zur Niedrig-/Mittelwasservorhersage als auch zur Hochwasservorhersage und wird in mehreren Flussgebieten operationell eingesetzt). Ende Herbst, bei Zunahme der Häufigkeit von Niedrigwasserständen steht eine Person in Rufbereitschaft. Vorhersage u.a. für die Schifffahrt (Deutschland, Niederlande): ELWIS.
 - BW: täglich aktuelle (Niedrigwasser-)vorhersagen für den Rhein von Konstanz bis Mannheim sowie seiner wichtigsten Zuflüsse (LARSIM). Zusätzliche Veröffentlichung einer No Rain- Vorhersagevariante, um die Entwicklung aufzuzeigen, die beim Ausbleiben von Niederschlag in den kommenden 7 Tagen eintritt.
 - HE, RLP: Niedrigwasservorhersage für Nebengewässer durch Anwendung von LARSIM.
 - BY: Vorhersagen (auch für den Main) werden täglich durchgeführt und im Hochwassernachrichtendienst/HND-Internetangebot des Bayerischen Landesamts für Umwelt veröffentlicht.
 - NRW: Keine wirkliche Vorhersage aber besondere Aufmerksamkeit bei den winterlichen Niederschlägen (wichtig für die Grundwasserneubildung).
- In den Niederlanden erfolgen Informationen und Vorhersagen auf der Grundlage von Modellen basierend auf Wettervorhersagen. In den Niederlanden wird derzeit auch das WABES-Instrument entwickelt. Damit werden unter anderem auf der Grundlage meteorologischer Prognosen und Klima-Entwicklung langfristige Vorhersagen in Bezug auf die Niedrigwassersituation gemacht, um Nutzer über die Verfügbarkeit von Wasser an den für sie relevanten Standorten im Hauptgewässersystem zu informieren. Für das operationelle Monitoring und die Niedrigwasserberichtserstattung (u.a. für die Schifffahrt) werden die RWsOS-Modelle angewandt.
- In Luxemburg gibt es keine Niedrigwasservorhersage an sich. In Zukunft ist es angedacht, das Vorhersagemodell LARSIM auch im Niedrigwasserfall zu benutzen, um den minimal möglichen Abfluss im Vorhersagezeitraum bei Ausbleiben von Niederschlag abschätzen zu können. Ein spezifischer Meldedienst und die Erstellung von Lageberichten sollen dann aktiviert werden können. Hierfür sind jedoch Anpassungen am Modell und der Prozedur erforderlich.

6.4.2 Operatives Management und Maßnahmen

In den Staaten gibt es unterschiedliche **gesetzliche Grundlagen:**

- National in Deutschland Wasserhaushaltsgesetz, in Frankreich das Umweltgesetz und nationale Rundschreiben über Niedrigwasserereignisse, in den Niederlanden das Wassergesetz, das Deltaprogramm und die Delta-Beschlüsse.
- Regional eine länderspezifische oder kantonale Ausgestaltung in Deutschland bzw. der Schweiz, den (inter)departementalen Rahmenerlassen in Frankreich und den Wassermanagementplänen der Wasserverbände in den Niederlanden.

Die EU-Staaten im Rheineinzugsgebiet sind verpflichtet, die WRRL national umzusetzen. Somit werden Bewirtschaftungspläne (BWP) aufgestellt, die auch die Problematik des Niedrigwassers beinhalten.

Betreffend der **Planung und Entscheidung von**

Niedrigwassermanagementmaßnahmen sind in der Schweiz die Kantone zuständig (u.a. Erstellung von Wasserversorgungsplänen), die Länder in Deutschland (BWP, regionale Entwicklungspläne), in Luxemburg die nationale Ebene (BWP, Notfallplan für Trinkwasserversorger), die Departements in Frankreich („Arrêté-cadres“ die für jeden Pegel folgende Handlungsphase bezogen auf Schwellenwerten definieren: Wachsamkeit, Warnung, verstärkte Warnung/Alarm, Krise) sowie in den Niederlanden der Staat, die Provinzen und die Wasserverbände (auf nationaler und regionaler Ebene: Nationaler Wasserplan, BWP, Entwicklungsplan, Wassermanagementpläne der Wasserverbände).

Die **Planung und Organisation des (Krisen)Managements**

(Abstimmung/Beschlussfassung im Vorfeld einer Trockenheitsperiode oder eines Niedrigwasserereignisses) obliegt bei den Staaten am Rhein hauptsächlich der regionalen Ebene (Kantone, Bundesländer, Departements/Regionen, Wasserverbände) aber auch der nationalen Ebene in Luxemburg, den Niederlanden oder Frankreich (bei einem sehr großen Ereignis) mit der Aufstellung von zentralen Koordinationszellen. Hier sind unterschiedliche Akteure verantwortlich wie z.B. das Comité sécheresse, die regionale Trockenheitsberatung. In den Entscheidungs- oder Beratungsgremien bzw. in deren Plänen liegen Angaben und Prozesse zur **Priorisierung** von Funktionen und Nutzungen vor, die während einer Trockenperiode oder einem Niedrigwasserereignis eingeschränkt werden oder gewährleistet sein müssen. Beispiele:

- Die französischen „Arrêté-cadres“ definieren 4 Stufen: die « Wachsamkeitsperiode » (Sensibilisierungsmaßnahmen), « Warnperiode » (Einschränkungsmaßnahmen), « Alarmperiode » (stärkere Einschränkungen) und „Krise“ (Beendigung von nicht prioritären Entnahmen). Zusammengefasst sehen die Prioritäten – ähnlich wie in Luxemburg - so aus: zuerst die Trinkwasserversorgung, dann die wirtschaftlichen und freizeithlichen Nutzungen.
- In den Niederlanden ist es Aufgabe der LCW, die Maßnahmen zur Verteilung des verfügbaren Wassers empfehlen. Dazu stützt sie sich auf eine nationale Verdrängungsreihe (vgl. Abb. 7), die festlegt, welchen Wassernutzern bei Trockenheit Vorrang eingeräumt wird (Kategorie Sicherheit, z.B. der Deiche und irreversible Schäden an der Natur: höchste Priorität). Außerdem gibt es in den Niederlanden 4 Stadien der Krisenvorbereitung und des Krisenmanagements (normale Situation, Anzeichen für Wassermangel, Wassermangel, drohende Krise bedingt durch Wassermangel).

Kategorie 1 Sicherheit und Vermeidung unumkehrbarer Schäden	Kategorie 2 Versorgungsunternehmen	Kategorie 3 Hochwertige Nutzung in kleinem Umfang	Kategorie 4 Übrige Belange (ökologische Erwägung, auch für die Natur)
1. Stabilität der Hochwasserschutzanlagen 2. Kompaktion und Setzung (Moore und Hochmoore) 3. Natur (in Verbindung mit Bodenbeschaffenheit)	1. Trinkwasserversorgung 2. Energieversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Vorübergehende Beregnung kapitalintensiver Pflanzen • Prozesswasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Schifffahrt • Landwirtschaft • Natur (so lange kein unumkehrbarer Schaden auftritt) • Industrie • Freizeitnutzung der Gewässer • Binnenfischerei
geht vor →	geht vor →	geht vor →	

Abbildung 7: Nationale Verdrängungsreihe Niederlande (MVW, 2009a, 2009b)

Operative Wassermanagement-Maßnahmen (einschließlich Wasserverteilung) (siehe auch z.T. im Kapitel 6 und Abbildung 3)

Außer der Information und Sensibilisierung der Öffentlichkeit und der Nutzer (auch zum präventiven/verantwortungsbewussten Handeln und sparsamen Umgang mit der Ressource Wasser) ist eine Reihe von Maßnahmen in allen Staaten vorhanden: Einsatz/Umschaltung kleiner Wasserversorgungseinheiten, (Trink)Wasserverteilung, spezifische Maßnahmen zur Abflussunterstützung und Grundwasseranreicherung sowie diverse Nutzungseinschränkungen. Kritische Funktionen werden detailliert im Kapitel 6.3.2 beschrieben. Grundsätzlich können nicht alle Auswirkungen von Niedrigwasser durch (operative) Managementmaßnahmen ausgeglichen oder aufgehoben werden.

Exkurs: Niedrigwassermanagement und lokale Wasserknappheit in der Schweiz (Zahner, 2017): Die Schweizer Methode für das Niedrigwassermanagement besteht aus 3 Modulen, 2 präventive und 1 für das kurzzeitliches (Krisen)management. Im ersten Modul werden Risikogebiete identifiziert. Das Endprodukt dieses Moduls sind Referenzkarten zur Wasserknappheit. Modul 2 befasst sich mit der langfristigen Bewirtschaftung (strategische Planung) der Wasserressourcen. Modul 3 ist ein Werkzeugkasten zur Steuerung des Restrisikos. Sie enthält Maßnahmen zur Bewältigung von Nutzungskonflikten und zur Vermeidung von Schäden für Nutzer und die Ökologie.

7. Untersuchung der historischen Pegelmessreihen am Rhein

7.1 Langfristverhalten der Niedrigwasserkennwerte

Untersucht wurden zunächst die markanten Niedrigwasserereignisse der letzten 100 Jahre (1914-2015). Im Gegensatz zu Hochwasserereignissen, bei denen selten im ganzen Einzugsgebiet des Rheins und an allen Rheinabschnitten Hochwasser herrscht, zeichnen sich Niedrigwasserereignisse durch ein rheingebietsweites Auftreten aus.

Niedrigwasserereignisse sind an lange andauernde und großräumig herrschende Wetterlagen gebunden, die so in der Regel rheinweit zum Ausdruck kommen. Insgesamt sind im obengenannten Zeitraum (1914-2015) 21 Niedrigwasserereignisse aus 17 Jahren zu verzeichnen. Zur statistischen Einordnung der Jährlichkeit des Niedrigwasserabflusses und der Niedrigwasserdauer wurde der Referenzzeitraum 1961-2010 herangezogen, der den jetzigen Verhältnissen entspricht. Durch diesen Ansatz scheinen die Jährlichkeiten der Ereignisse aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts „überhöht“ zu sein, entsprechen aber den Jährlichkeiten, würden diese Ereignisse aktuell auftreten. Somit kann das Ausmaß der Niedrigwasserereignisse bezogen auf heutige Verhältnisse relativ verglichen werden. In der Tabelle 2 sind die Jährlichkeitsspannen aufgeführt, die sich auf der Strecke von Basel bis Lobith ergeben. Die Verhältnisse an den Pegeln Diepoldsau und Rekingen sind dem nivalen Abflussregime zuzuordnen, dort treten die Niedrigwasserereignisse im Jahresverlauf oft zu anderen Zeiten auf als an den anderen Pegeln. Die pegelbezogenen Jährlichkeiten sind detailliert in den Beschreibungen der jeweiligen Niedrigwasserjahre aufgeführt.

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die extremen historischen Niedrigwasserereignisse in den 1920-iger und 1940-iger Jahren aufgetreten sind. Überwiegend treten die Niedrigwasserereignisse in den Herbst- und Wintermonaten auf. Bei den selteneren aber hinsichtlich der Abflüsse weniger extremen Sommerereignissen (1976, 2003 und 2006) kann sich eine Problematik mit gleichzeitig sehr hohen Wassertemperaturen ergeben. Im Referenzzeitraum treten ausgeprägte Niedrigwasserereignisse 1962/63 und 1971/72 auf, danach gehen die Niedrigwasserereignisse in ihrem Ausmaß, mit Ausnahme des Ereignisses im Jahr 2003, deutlich zurück. Hervorzuheben sind außerdem die Niedrigwasserjahre 1921 und 1976 mit jeweils drei Ereignissen, wobei auch hier die Ereignisse aus 1976 deutlich geringer ausfallen. Die Sommerereignisse 2003 und 2006 waren mit sehr hohen Wassertemperaturen verbunden, wobei die Abflüsse 2006 keine besondere Niedrigwassersituation darstellten.

Tabelle 2: Übersicht der Niedrigwasserereignisse 1920 bis 2015 am Rhein mit Angabe der Jährlichkeiten (statistische Eintrittswahrscheinlichkeiten) der kleinsten Abflussmenge „NM7Q“ und der maximalen Unterschreitungsdauer „MaxD“ < MNM7Q (Pegel Rekingen bis Lobith).

Niedrigwasser-Ereignis		Abfluss Jährlichkeit [a] NM7Q	Dauer Jährlichkeit [a] MaxD	Bemerkung
Nov/Dez	1920	15-100	15-50	
Mrz-Mai	1921	15-100	50-100	
Sep/Nov	1921	5-100	5-100	
Nov/Dez	1921	20-100	10-15	
Okt/Nov	1943	10-20	5-20	
Aug-Nov	1947	40-100	20-100	
Jul-Nov	1949	10-100	20-100	
Sep53-Jan54	1954	15-100	20-50	
Sep-Dez	1959	15-55	10-100	
Okt-Dez	1962	15-70	40-75	
Jan-Mrz	1963	20-65	15-50	
Okt/Nov	1971	20-35	10-35	
Okt/Nov	1972	10-35	5-20	
Jul	1976	2-15	2-5	
Aug/Sep	1976	2-5	2-10	
Okt/Nov	1976	2-5	2-10	
Okt/Nov	1985	5-15	5-10	
Aug-/Sep	2003	5-35	5-30	hohe Wassertemperatur
Jul	2006	<2	<2	hohe Wassertemperatur
Nov-Dez	2011	5-10	5-10	
Okt/Nov	2015	2-10	2-20	
	Innerhalb Referenzperiode der statistischen Einordnung			
	Extreme Ereignisse			
	Jahre mit mehreren Niedrigwasserereignissen			

In der Zusammenstellung der Abflusskennwerte der untersuchten Pegel (für die Referenzperiode 1961 - 2010) sieht man in den Tab. 3 und 4 die Bedeutung des Abflusses und des Niedrigwasserabflusses am Pegel Basel für alle unterliegenden Pegel. Vom Pegel Rekingen bis zum Pegel Basel nehmen durch den Zufluss der Aare die Abflüsse um mehr als das Doppelte zu. Sowohl der Mittelwasserabfluss von 1065 m³/s als auch der mittlere Niedrigwasserabfluss von 508 m³/s am Pegel Basel repräsentiert noch etwa drei Viertel der Abflüsse am Pegel Worms, etwa 60 % am Pegel Kaub und immer noch rund 50 % der Abflüsse am Niederrhein.

Tabelle 3: Mittel- und Niedrigwasserkennwerte an Pegeln am Rhein

Abflusskennwerte an verschiedenen Pegeln des Rheins				
	Periode 1961-2010 (Wasserwirtschaftsjahr)			
[m ³ /s]	MQ	MNQ	MNM7Q	NQ
Diepoldsau	233	72	92	41
Rekingen	445	232	238	134
Basel	1065	508	527	319
Maxau	1255	618	645	373
Worms	1431	694	720	400
Mainz	1671	824	850	501
Kaub	1713	824	851	525
Andernach	2115	967	998	622
Köln	2175	999	1028	644
Lobith	2287	1066	1095	665

Tabelle 4: Prozentuale Abflussanteile des Abflusses vom Pegel Basel

Prozentuale Abflussanteile des Abflusses vom Pegel Basel				
	Periode 1961-2010 (Wasserwirtschaftsjahr)			
[% von Basel]	MQ	MNQ	MNM7Q	NQ ³
Basel	100	100	100	100
Maxau	85	82	82	86
Worms	74	73	73	80
Mainz	64	62	62	64
Kaub	62	62	62	61
Andernach	50	53	53	51
Köln	49	51	51	50
Lobith	47	48	48	48

Aufgrund des nivalen Abflussregimes im Alpenraum weisen die dortigen Niedrigwasserabflüsse ein Minimum im Winter (Niederschläge sind in Form von Schnee gebunden) und ein Maximum nach der Schneeschmelze im Sommer auf. Durch den hohen Abflussanteil aus Gebieten mit nivalem Regime werden die Abflüsse am Rhein auch im unterhalb liegenden Bereich mit pluvialem Abflussregime (in den Einzugsgebieten der Nebengewässer hauptsächlich Niedrigwasserzeiten im Sommer) bis in den Sommer hinein gestützt.

³ NQ ist der niedrigste Wert im Zeitraum 1961-2010. Das berechnete Verhältnis zum NQ am Pegel Basel kann für die unterschiedlichen Pegel aus unterschiedlichen Jahren stammen und muss nicht mit dem Jahr des NQ-Wertes am Pegel Basel übereinstimmen. In einem konkreten Niedrigwasserereignis ergeben sich davon abweichende Verhältniswerte und der relative Abflussanteil vom Pegel Basel kann insbesondere bei sommerlichen Niedrigwasserereignissen deutlich höher sein.

Zur weiteren Analyse und Visualisierung des Niedrigwasserverlaufs und der hydrologischen Vorgeschichte wurde für alle historischen Niedrigwasserereignisse eine Grafik mit den Abflussganglinien der untersuchten Pegel erstellt. In der Abbildung 8 sind die Abflussganglinien für das Niedrigwasserereignis im August und September 2003 dargestellt. Die Grafiken sind für alle Ereignisse zusammen mit den entsprechenden Kennzahlen und Jährlichkeitseinordnungen in Datenblättern zu den Extremereignissen dargestellt (vgl. Kap. 7.5 und Anlage 2).

In der Abbildung 8 zeigt die unterste (blaue) Kurve für den Pegel Diepoldsau einen deutlich von den anderen Ganglinien abweichenden Verlauf. Der Pegel Diepoldsau repräsentiert einerseits ein nivales Abflussregime, das durch Schneerücklage und Schneeschmelze geprägt ist, und andererseits enthält er starke anthropogene Beeinflussungen durch zeitliche Umverteilung durch Rückhalte- und Kraftwerkbetrieb. Die nächst höhere Ganglinie des Pegels Rekingen zeigt einen ausgeglichenen Verlauf, der vor allem dem jahreszeitlichen Verlauf des Ausflusses aus dem Bodensee zuzuordnen ist. Die weiteren Ganglinien ab dem Pegel Basel zeigen dagegen eine hohe Ähnlichkeit untereinander und lassen deutlicher den Einfluss von Niederschlagsereignissen erkennen. Der sehr ähnliche Verlauf, insbesondere im Niedrigwasserbereich von August und September, resultiert aus dem hohen Abflussanteil aus dem Alpen- und Voralpenraum am Pegel Basel, der auch in den Unterliegerpegeln mit sehr hohen Anteilen enthalten ist und selbst am Pegel Lobith noch mit rund 50 % zum Gesamtabfluss beiträgt. Das Niedrigwasserereignis entwickelte sich mit kurzen niederschlagsbedingten Unterbrechungen ab Juli 2003 und führte zu niedrigsten Abflüssen Ende September 2003, die dann durch ein deutliches Abflussereignis Anfang Oktober 2003 abgelöst wurden.

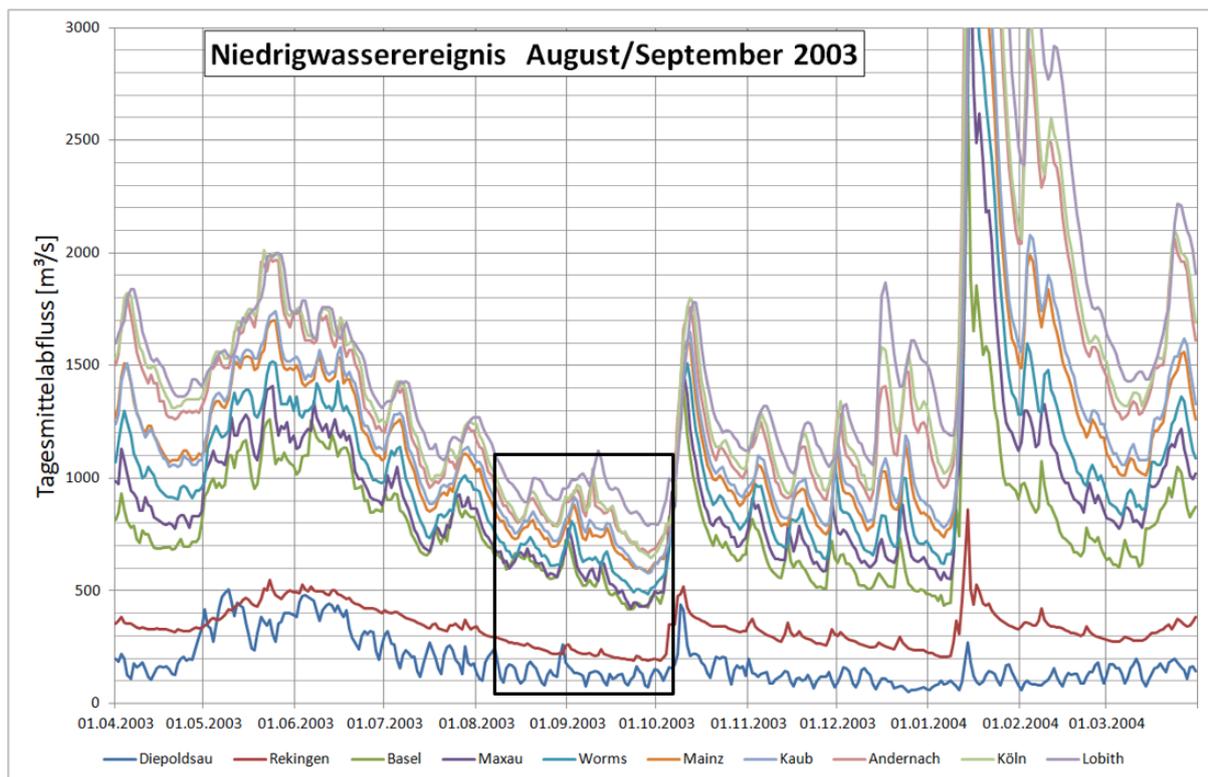


Abbildung 8: Abflussganglinien für das Niedrigwasserereignis August/September im Wasserwirtschaftsjahr 2003

7.2 Referenzzeitraum und Niedrigwasserkenngrößen

Zur Überprüfung der Zeitreihen auf Homogenität und Änderungsverhalten wurde das zeitliche Verhalten der jährlichen NM7Q-Werte an den Rheinhauptpegeln mittels Sprunganalyse untersucht. Die Sprunganalyse ist ein statistisches Verfahren zur Detektion plötzlicher Veränderungen in einer Zeitreihe. In der Regel werden dabei Teilzeiträume übergreifend hinsichtlich ihres Verhaltens verglichen. Wird ein signifikanter Bruchpunkt ermittelt, ist eine Homogenität der untersuchten Zeitreihe nicht gegeben. Das bedeutet, dass das Verhalten der Teilzeitreihen vor und nach dem Bruchpunkt unterschiedlich ist.

Nachfolgend sind exemplarisch die Zeitreihen der NM7Q-Werte der vorliegenden Beobachtungszeiträume mit den Zeitpunkten der auftretenden Sprünge für die Pegel Diepoldsau, Maxau, Kaub und Köln dargestellt (vgl. Abb. 9 bis 12).

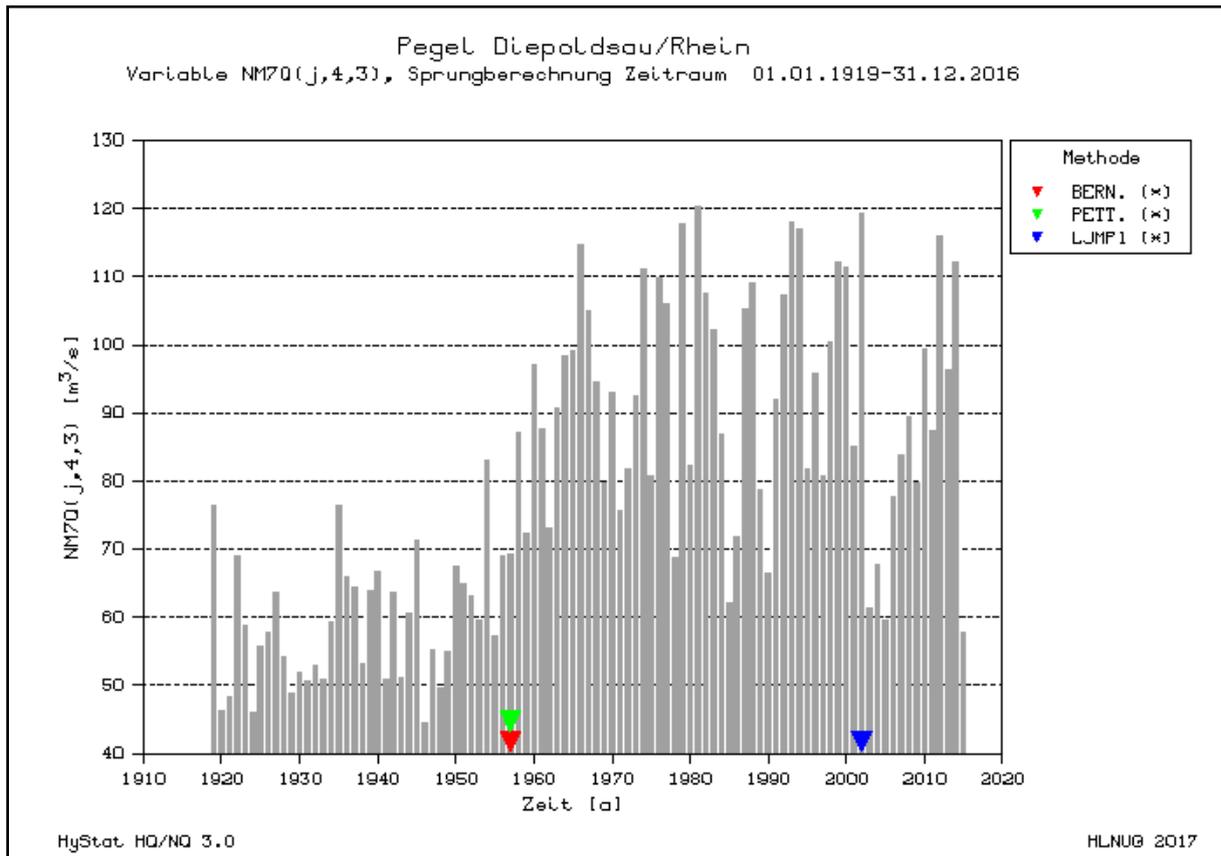


Abbildung 9: Jährliche Werte NM7Q am Pegel Diepoldsau und festgestellte Bruchpunkte

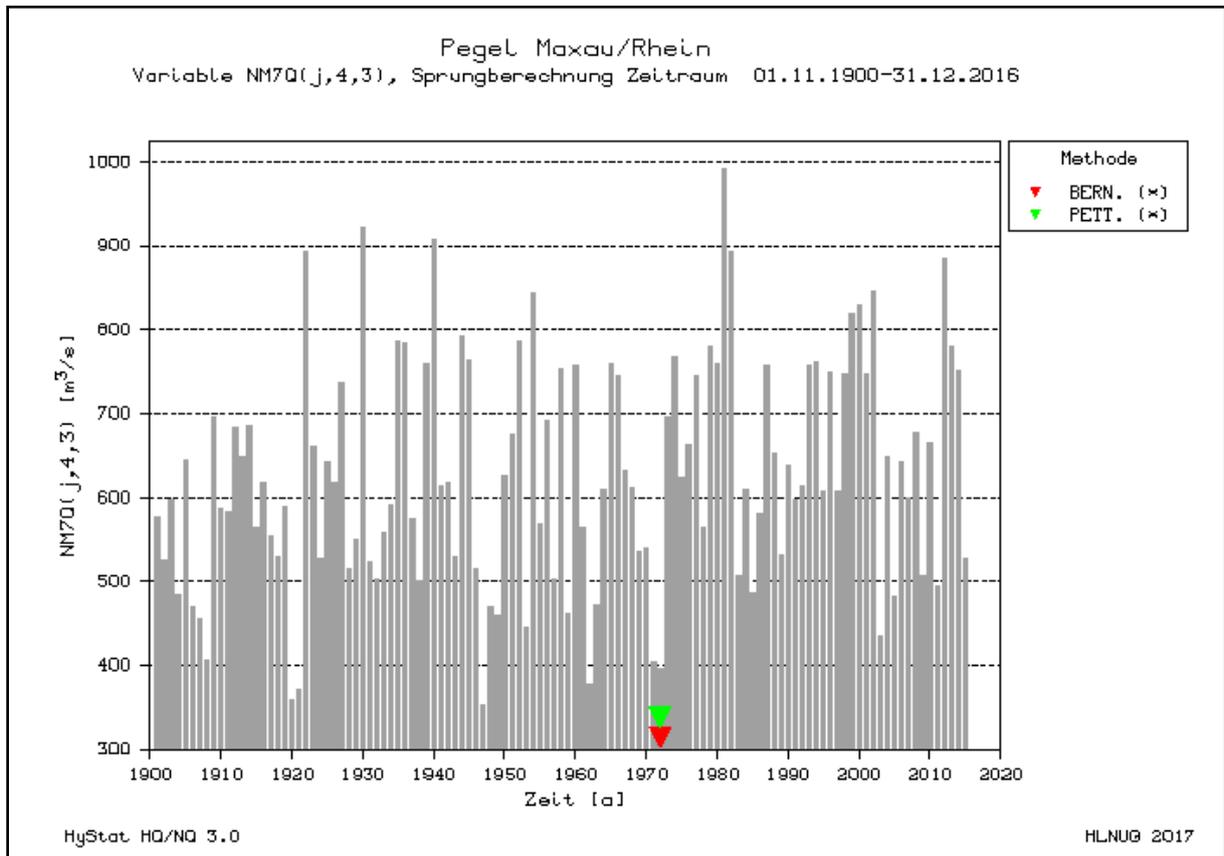


Abbildung 10: Jährliche Werte NM7Q am Pegel Maxau und festgestellte Bruchpunkte

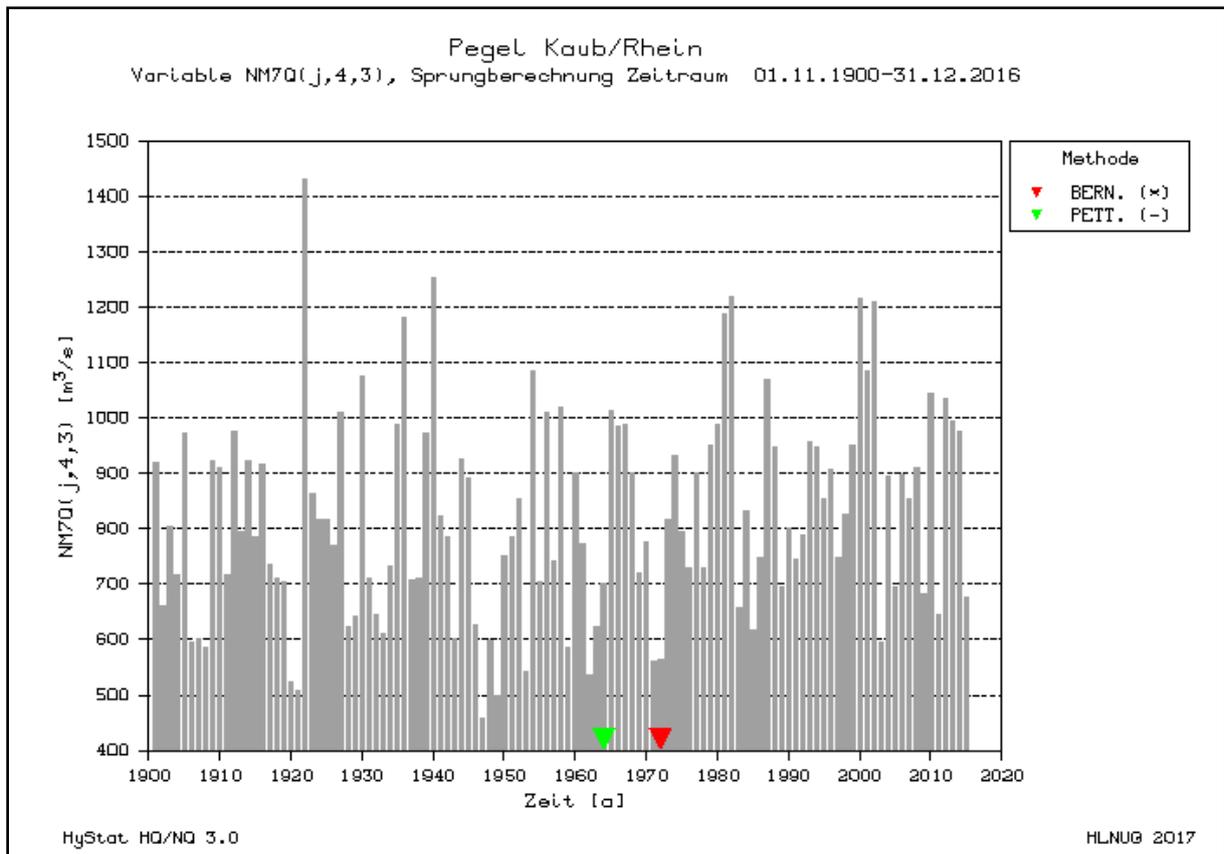


Abbildung 11: Jährliche Werte NM7Q am Pegel Kaub und festgestellte Bruchpunkte

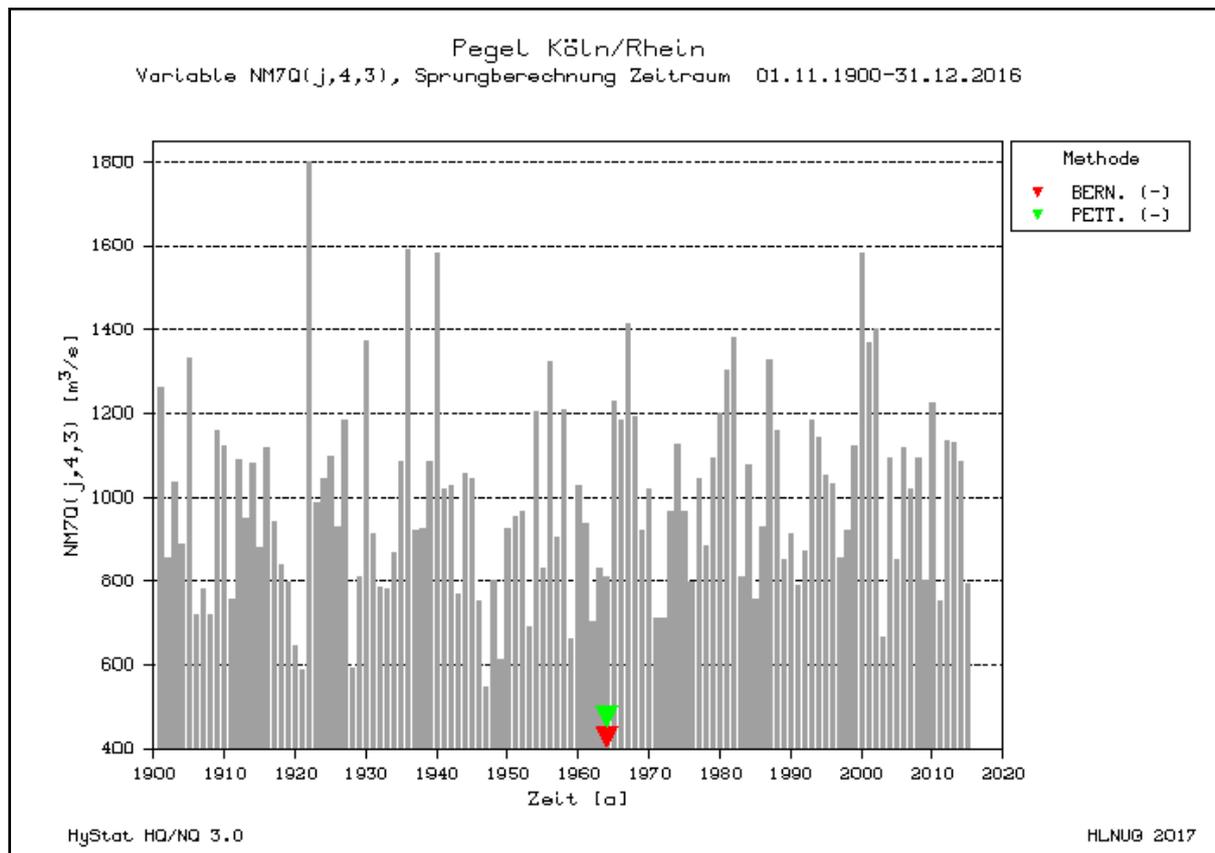


Abbildung 12: Jährliche Werte NM7Q am Pegel Köln und festgestellte Bruchpunkte

Eine deutliche Inhomogenität lässt sich für den Pegel Diepoldsau erkennen, für den die Niedrigwasserabflüsse nach erfolgtem Speicherausbau im Einzugsgebiet ab etwa den 1960-iger Jahren gegenüber dem gesamten davor liegenden Zeitraum deutlich zugenommen haben. Am Pegel Maxau tritt der Bruchpunkt etwas später auf (ca. 1970), für den Pegel Kaub zeigen die beiden Methoden zur Bruchpunktermittlung etwas voneinander abweichende Bereiche (1960 bis 1970) und am Pegel Köln tritt der Bruchpunkt wieder in den 1960-iger Jahren auf (vgl. Tabelle 5). Für alle Pegel lässt sich erkennen, dass die geringsten NM7Q-Jahreswerte vor 1960 aufgetreten sind, diese Extremwerte wurden seitdem nicht mehr erreicht. Trends oder Tendenzen zu abnehmenden Niedrigwasserabflüssen sind in den NM7Q-Zeitreihen seit 1960 nicht zu erkennen.

Tabelle 5: Zeitpunkte (Jahresangabe) von Bruchpunkten nach Sprunganalysen

Pegel	Sprung nach BERNIER	Sprung nach PETTIT
Diepoldsau	1957	1957
Rekingen	1964	1964
Basel	1972	1972
Maxau	1971	1971
Worms	1971	1971
Mainz	1971	1971
Kaub	1971	1963
Andernach	1963	1963
Köln	1963	1963
Lobith	1978	1978

Entsprechend des Auftretens der signifikanten Sprünge zwischen 1957 und 1972 (mit Ausnahme von Lobith) wurde als Referenzzeitraum eines quasistationären und den aktuellen Bedingungen repräsentierenden Zustands die **Zeitreihe 1.4.1961 bis 31.3.2011 als 50-jährliche Bezugsreihe** für die weiteren statistischen Einordnungen zu Grunde gelegt. Das bedeutet, dass in der weiteren Analyse der MNM7Q für den Zeitraum der wasserwirtschaftlichen Jahre 1961-2010 als Schwellenwert verwendet wird,

um die jährlichen NM7Q-Werte, die aus den Messreihen abzuleiten sind, zu prüfen und daraus die Jährlichkeiten zu bestimmen.

7.3 Niedrigwasserabflüsse

7.3.1 Trendanalyse der Niedrigwasserkennwerte

Mit der Trendanalyse können langfristige Tendenzen abflussbezogener Serien untersucht und ggf. nachgewiesen werden. Ausgewertet wurde insbesondere die Ermittlung einer Trendgeraden nach dem Verfahren der Minimierung der Fehlerquadratsumme (FQS). Die Entscheidung auf Vorliegen eines statistisch signifikanten Trends erfolgte mit dem parameterfreien Mann-Kendall-Test (der keinen geradlinigen Verlauf des Trends voraussetzt) und mit dem t-Test des Steigungskoeffizienten der Trendgerade (der allerdings eine Normalverteilung der Residuen des geschätzten Regressionsmodells voraussetzt).

Das Trendverhalten der Niedrigwasserabflüsse NM7Q zeigt für den gesamten (nicht homogenen) Beobachtungszeitraum für die Rheinpegel von Diepoldsau bis Andernach rechnerisch einen signifikant zunehmenden Trend ($p < 0.05$) (vgl. Tab. 6), exemplarisch in der Zeitreihe für den Pegel Basel in untenstehender Grafik (vgl. Abb. 13) dargestellt.

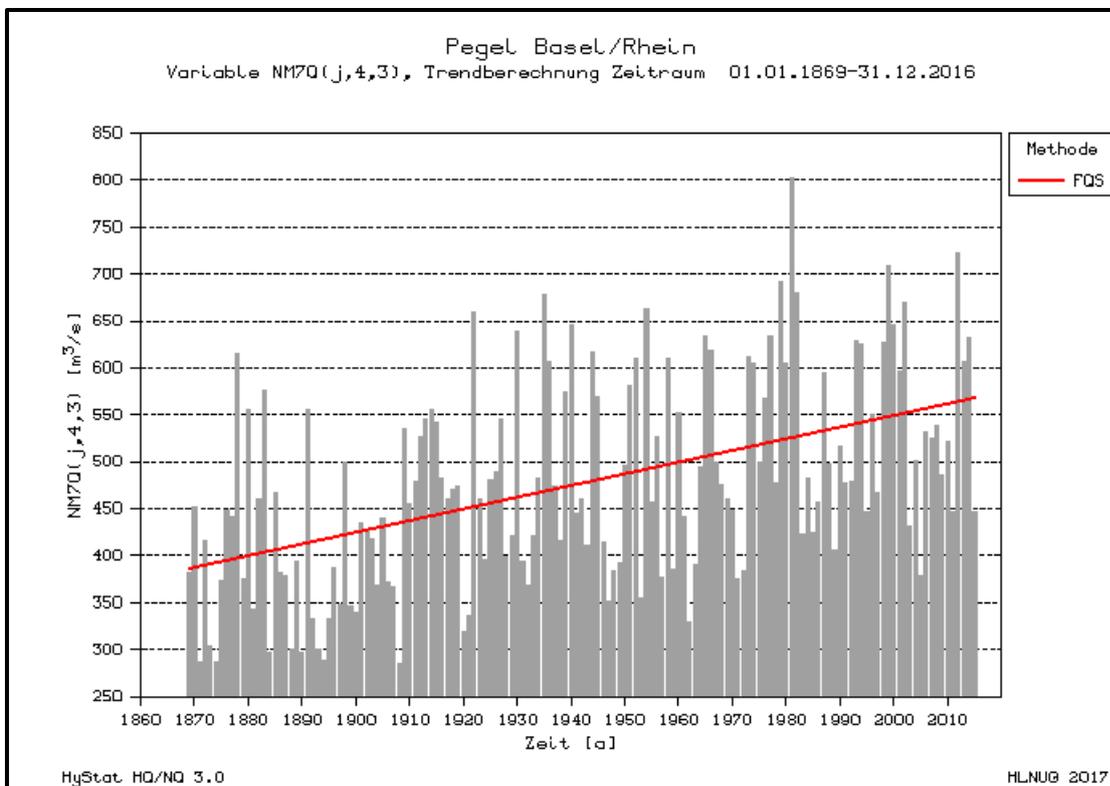


Abbildung 13: Trendanalyse der NM7Q-Serie am Pegel Basel

Für die Pegel Köln (vgl. Abb. 14) und Lobith lässt sich dagegen kein signifikanter Trend nachweisen (vgl. Tab. 6).

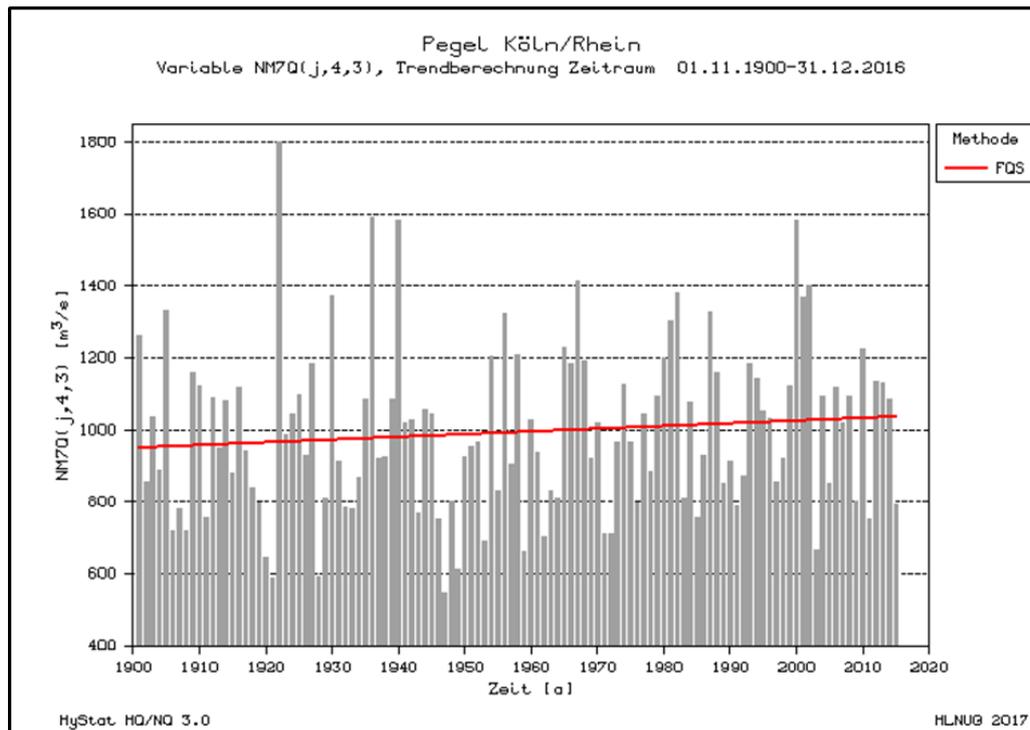


Abbildung 14: Trendanalyse der NM7Q-Serie am Pegel Köln

Bei einer Trendanalyse mit Bezugszeitraum der festgelegten Referenzperiode 1.4.1961 bis 31.3.2011 ist an keinem der Rheinpegel ein signifikanter Trend nach Mann-Kendall nachweisbar. Dies unterstreicht die Abtrennung dieses Zeitraumes nach der durchgeführten Sprunganalyse und zeigt mehr oder weniger homogene Verhältnisse für diesen Referenzzeitraum.

In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse der Trendtests für die Kenngröße NM7Q angegeben (vgl. Tab. 6).

Tabelle 6: Ergebnisse der Trendanalyse der NM7Q-Serien für den gesamten Untersuchungszeitraum und die homogene Referenzperiode (MK = Mann-Kendall-Test; FQS/t-Test = t-Test des Steigungskoeffizienten der Trendgerade).

Pegel	Trend MK gesamt	FQS / t-Test gesamt ⁴	Trend MK 1961-2011	FQS / t-Test 1961-2011
Diepoldsau	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend
Rekingen	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend
Basel	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend
Maxau	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend	kein Trend
Worms	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend	kein Trend
Mainz	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	+ (p= 0,95)
Kaub	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	+ (p= 0,95)
Andernach	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend
Köln	kein Trend	kein Trend	kein Trend	kein Trend
Lobith	kein Trend	kein Trend	kein Trend	kein Trend

Nach den Trenduntersuchungen lässt sich somit keinerlei Verschärfung der Niedrigwassersituation für die Referenzperiode (1961-2010) erkennen. Erweitert man den Betrachtungszeitraum auf die gesamte Beobachtungsperiode (von Beginn der Messdaten Anfang 20. Jh. bis 2015) ergeben sich dagegen mit Ausnahme des Niederrheins zunehmende Trends der Niedrigwasserabflüsse. Auch für länger anhaltende

⁴ Entspricht der roten Trendlinie in den Abbildungen 13 bis 16.

Niedrigwasserabflüsse an 21 zusammenhängenden Tagen (NM21Q) lassen sich eher zunehmende Tendenzen erkennen (vgl. Tab. 7):

Tabelle 7: Ergebnisse der Trendanalyse der NM21Q-Serien für den gesamten Untersuchungszeitraum und die homogene Referenzperiode (MK = Mann-Kendall-Test; FQS/t-Test = t-Test des Steigungskoeffizienten der Trendgerade).

Pegel	Trend MK gesamt	FQS / t-Test gesamt	Trend MK 1961-2011	FQS / t-test 1961-2011
Diepoldsau	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend
Rekingen	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	+ (p= 0,95)
Basel	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend
Maxau	+ (p= 0,95)	kein Trend	kein Trend	kein Trend
Worms	kein Trend	kein Trend	kein Trend	+ (p= 0,95)
Mainz	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)
Kaub	+ (p= 0,95)	kein Trend	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)
Andernach	kein Trend	kein Trend	kein Trend	+ (p= 0,95)
Köln	kein Trend	kein Trend	kein Trend	kein Trend
Lobith	kein Trend	kein Trend	kein Trend	+ (p= 0,95)

Für das Sommerhalbjahr (gültig für den Zeitraum 1.4. bis 30.9. jedes Jahres) des Referenzzeitraums zeigt sich für keinen der Pegel ein signifikanter Trend der NM7Q-Werte. Für das Winterhalbjahr (1.10. bis 31.3 jedes Jahres) zeigt sich ebenfalls kein signifikanter Trend nach Mann-Kendall, nach dem linearen Regressionsansatz (FQS) zeigen die Pegel Worms, Mainz (vgl. Abb.15-16) und Kaub (also vom Übergang des Oberrheins zum Mittelrhein) einen zunehmenden Trend der NM7Q-Werte. Einflüsse sind hier möglicherweise aus dem Neckar- und Mainezugsgebiet gegeben, die weiter stromabwärts zurückgehen.

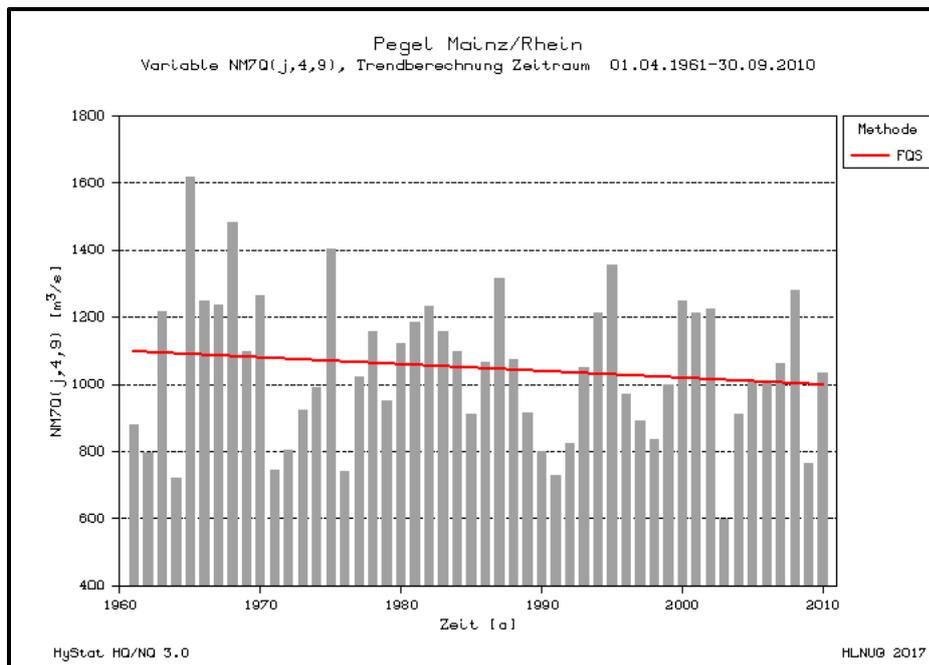


Abbildung 15: Trendanalyse der NM7Q-Serie für das Sommerhalbjahr (April-September) am Pegel Mainz

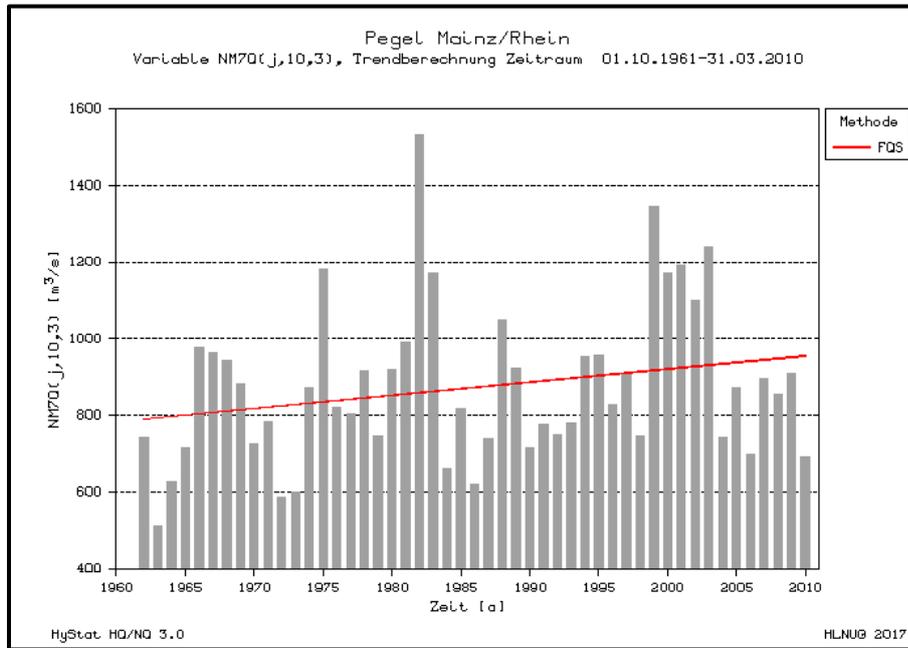


Abbildung 16: Trendanalyse der NM7Q-Serie für das Winterhalbjahr (Oktober-März) am Pegel Mainz

7.3.2 Wahrscheinlichkeitsanalyse der Niedrigwasserkennwerte

Zur späteren Einordnung von Niedrigwasserabflüssen wurde mit den Serien der NMxQ-Werte (kleinste mittlere Niedrigwasserabflüsse an x zusammenhängenden Tagen) eine Extremwertstatistik durchgeführt. Die Verteilung der Niedrigwasserserien wurde mit dem L-Momente-Parameterschätzverfahren an die Generelle Extremwertverteilung (GEV-LM) angepasst. Die daraus abgeleiteten Niedrigwasserquantile sind in den Tabellen 8 bis 12 für die untersuchten Pegel angegeben. Mit diesen Ergebnissen kann den aufgetretenen Niedrigwasserabflüssen eine Auftretenswahrscheinlichkeit (Jährlichkeit) zugeordnet werden (vgl. Kap. 7.4). Zu beachten ist dabei, dass die Statistik auf Basis des Referenzzeitraums 1961-2010 ermittelt wurde und den heutigen Verhältnissen entspricht (vgl. Kap. 7.1). Frühere Niedrigwasserereignisse (vor 1960) erscheinen bei Einordnung zu diesen Werten mit einer zu seltenen Eintrittswahrscheinlichkeit behaftet. Die vor 1960 aufgetretenen Niedrigwasserabflüsse- oder Dauern würden aber bei heutigem Auftreten diesen Jährlichkeiten entsprechen.

Tabelle 8: Niedrigwasserabflüsse NM1Q bestimmter Wiederkehrintervalle, ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)

Niedrigwasserabflusswahrscheinlichkeit: Reihenart NM1Q(j,4,3) , Verteilung GEV-LM ⁵ , Abflüsse in [m ³ /s]						
Jährlichkeit:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhein	71,6	60,4	54,7	50,2	45,2	42,0
Rekingen/Rhein	229	189	170	156	140	130
Basel/Rhein	502	426	390	362	333	314
Maxau/Rhein	618	510	454	410	361	330
Worms/Rhein	693	576	518	471	419	386
Mainz/Rhein	817	687	624	574	521	487
Kaub/Rhein	816	682	617	565	511	476
Andernach/Rhein	955	793	716	656	592	551
Köln/Rhein	985	821	743	683	619	578
Lobith/Rhein	1053	884	802	739	670	627

⁵ Generelle Extremwertverteilung mit L-Momente-Parameterschätzverfahren

Tabelle 9: Niedrigwasserabflüsse NM3Q bestimmter Wiederkehrintervalle ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)

Niedrigwasserabflusswahrscheinlichkeit: Reihenart NM3Q (j,4,3), Verteilung GEV-LM, Abflüsse in [m ³ /s]						
Jährlichkeit:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhein	82,4	69,3	62,5	57,1	51,0	47,1
Rekingen/Rhein	231	192	173	159	144	134
Basel/Rhein	509	431	394	365	335	315
Maxau/Rhein	629	519	463	418	369	337
Worms/Rhein	701	583	524	477	426	393
Mainz/Rhein	825	693	629	579	525	491
Kaub/Rhein	825	688	623	571	516	480
Andernach/Rhein	966	801	722	661	595	554
Köln/Rhein	993	828	750	690	627	587
Lobith/Rhein	1060	892	811	749	682	639

Tabelle 10: Niedrigwasserabflüsse NM7Q bestimmter Wiederkehrintervalle ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)

Niedrigwasserabflusswahrscheinlichkeit: Reihenart NM7Q (j,4,3), Verteilung GEV-LM, Abflüsse in [m ³ /s]						
Jährlichkeit:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhein	92,6	77,2	69,3	62,9	55,8	51,2
Rekingen/Rhein	234	194	176	162	147	137
Basel/Rhein	518	439	402	374	344	325
Maxau/Rhein	644	530	473	427	377	345
Worms/Rhein	716	593	533	486	434	401
Mainz/Rhein	839	702	638	588	535	501
Kaub/Rhein	841	699	632	580	524	489
Andernach/Rhein	982	812	732	670	604	563
Köln/Rhein	1010	840	761	701	637	597
Lobith/Rhein	1075	908	829	769	705	665

Tabelle 11: Niedrigwasserabflüsse NM21Q bestimmter Wiederkehrintervalle ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)

Niedrigwasserabflusswahrscheinlichkeit: Reihenart NM21Q (j,4,3), Verteilung GEV-LM, Abflüsse in [m ³ /s]						
Jährlichkeit:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhein	103	87,5	80,0	74,0	67,4	63,2
Rekingen/Rhein	246	204	184	169	153	143
Basel/Rhein	555	464	422	391	358	337
Maxau/Rhein	685	563	505	461	414	384
Worms/Rhein	765	630	568	520	470	439
Mainz/Rhein	895	742	671	618	561	526
Kaub/Rhein	905	744	669	611	550	511
Andernach/Rhein	1059	862	771	700	626	579
Köln/Rhein	1090	894	803	733	659	613
Lobith/Rhein	1148	957	869	801	729	684

Tabelle 12: Niedrigwasserabflüsse NM60Q bestimmter Wiederkehrintervalle ermittelt für jährliche Reihen (j) bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr April bis März (4,3)

Niedrigwasserabflusswahrscheinlichkeit: Reihenart NM60Q (j,4,3), Verteilung GEV-LM, Abflüsse in [m ³ /s]						
Jährlichkeit:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhein	113	98,7	92,0	86,9	81,3	77,8
Rekingen/Rhein	271	224	203	186	169	159
Basel/Rhein	644	530	476	435	390	362
Maxau/Rhein	791	647	579	526	469	433
Worms/Rhein	892	729	652	593	530	489
Mainz/Rhein	1046	855	765	695	621	574
Kaub/Rhein	1062	864	770	697	620	570
Andernach/Rhein	1274	1015	887	784	672	600
Köln/Rhein	1308	1049	921	820	710	640
Lobith/Rhein	1351	1101	983	890	792	729

7.4 Niedrigwasserdauern

An den Rheinhauptpegeln wurde das zeitliche Verhalten der jährlichen Niedrigwasserdauerwerte MaxD (maximale Andauer eines zusammenhängenden Ereignisses unterhalb des Schwellenwerts MNM7Q) und SumD (gesamte Anzahl der Unterschreitungstage unterhalb des Schwellenwerts MNM7Q) untersucht. In der Tabelle 13 sind die Mittelwerte der Niedrigwasserdauern für den Referenzzeitraum 1.4.1961 bis 31.3.2011 aufgeführt. Mit Ausnahme der Pegel Diepoldsau und Rekingen liegen die mittleren Unterschreitungsdauern des Abflusses MNM7Q bei 16 bis 20 Tagen. Die mittlere Gesamtanzahl der Tage unterhalb des Schwellenwerts MNM7Q beträgt rund 25 Tage im Jahr. Aufgrund des Auftretens von Jahren ohne Schwellenwertunterschreitung sind diese „mittleren“ Werte für einzelne aufgetretene Ereignisse mit Schwellenwertunterschreitungen zu gering. Eine bessere Interpretation kann durch die weiter unten erfolgte Extremwertstatistik der Unterschreitungsdauern bestimmter Jährlichkeiten erfolgen.

Tabelle 13: Durchschnittliche jährliche Unterschreitungstage des Schwellenwerts MNM7Q

Pegel	MaxD [Tage]	SumD [Tage]
Diepoldsau	7,6	24,5
Rekingen	24,2	29,2
Basel	19,6	26,7
Maxau	17,6	25,6
Worms	17,6	25
Mainz	18,1	27
Kaub	17,5	25,1
Andernach	16	24,2
Köln	16,7	23
Lobith	17,2	24,3

Die jährlichen Serien eignen sich wegen des Auftretens von Jahren ohne Unterschreitungen nicht zur statistischen Untersuchung der Wahrscheinlichkeiten des Auftretens von Niedrigwassern, die unterschiedliche Andauern von Tagen mit Schwellenwertunterschreitung aufzeigen. Aus diesem Grund wurden jährliche Serien nach dem indirekten Verfahren gemäß DVWK „Niedrigwasseranalyse“ (DVWK, 1992) erstellt und die extremwertstatistische Untersuchung mit diesen Serien durchgeführt. Die Ergebnisse für die Rheinhauptpegel für die Referenzperiode 1961-2010 sind in nachfolgender Tabelle 14 zusammengestellt:

Tabelle 14: Unterschreitungsdauern (Tage) n-jährlicher Niedrigwasser unterhalb des Schwellenwerts MNM7Q.

	T = 2a	T = 5a	T = 10a	T = 20a	T = 50a	T = 100a
Diepoldsau	3,5	9,1	14,0	16,6	21,2	26,3
Rekingen	7,0	30,8	49,0	65,9	85,1	
Basel	5,1	23,6	34,9	47,5	54,8	83,7
Maxau	4,9	23,4	34,2	47,4	63,7	89,4
Worms	5,4	23,5	35,1	49,3	67,8	
Mainz	5,6	24,5	38,1	55,7	80,9	
Kaub	5,5	23,3	35,7	55,0	74,4	
Andernach	5,8	23,8	39,7	52,9	73,2	85,2
Köln	5,8	23,8	38,2	52,1	75,1	87,8
Lobith	5,4	26,2	46,1	68,4	88,9	

Mittels dieser Jährlichkeitstabelle können historisch aufgetretene Niedrigwasser bezüglich der Unterschreitungsdauer einer Auftretenswahrscheinlichkeit zugeordnet werden (vgl. Kap. 7.5), für das Niedrigwasserereignis 2003 ergeben sich die in Tabelle 15 zusammengestellten Einordnungen. Bezüglich der Abflusswerte ist das Ereignis von Basel als 5-jährliches Ereignis zunehmend bis Köln als 35-jährliches Niedrigwasserereignis einzuordnen. Hinsichtlich der Niedrigwasserdauer ist das Ereignis mit Ausnahme des Pegels Andernach als ein 5- bis 10-jährliches Niedrigwasserereignis einzuordnen.

Die grafische Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Kennwertes MaxD (maximale Unterschreitungsdauer eines zusammenhängenden Ereignisses pro Jahr) ist exemplarisch für den Pegel Kaub in Abbildung 17 dargestellt, die Grafiken für alle Pegel finden sich in Anlage 3.

Tabelle 15: Einordnung von Niedrigwasserkennwerten des Ereignisses 2003 in Wiederkehrintervalle

Niedrigwasserkennwerte für das Ereignis August/September 2003

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sep 2003	Jährlichkeit Sep 2003	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Sep 2003	Jährlichkeit Sep 2003
Diepoldsau	92,2	108	< 2	4	2	< 2
Rekingen	238	193	5	7	22	2-5
Basel	527	431	5	5	20	5
Maxau	645	435	20	5	31	5-10
Worms	720	500	15	5	31	5-10
Mainz	850	596	20	6	33	5-10
Kaub	851	595	20	6	32	5-10
Andernach	998	682	20	6	62	30
Köln	1028	666	35	6	33	5-10
Lobith	1095	808	15	6	34	5-10

<p>MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010</p>
--

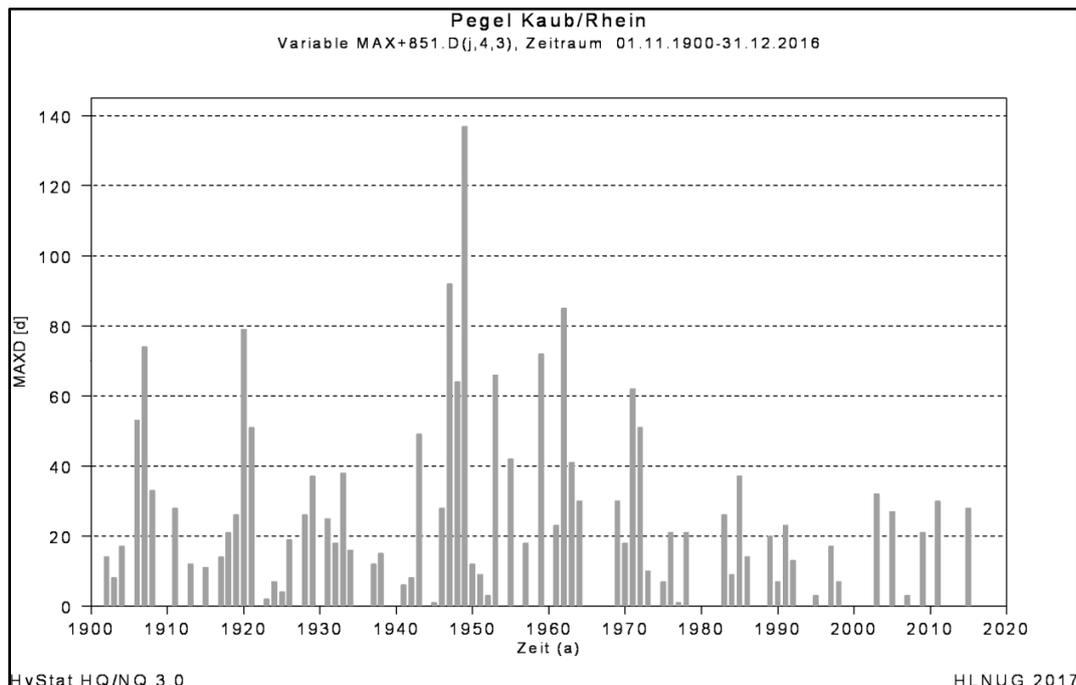


Abbildung 17: Jahresserie der Kenngröße Unterschreitungsdauer MaxD (in Tagen) für den Pegel Kaub

Niedrigwasserereignisse mit sehr langen Dauern von rund 80 Unterschreitungstagen des MNM7Q traten insbesondere Anfang des 20. Jahrhunderts, 1921, Ende der 1940-iger Jahre (mit bis zu 138 Unterschreitungstagen) und um 1960 auf. Im Jahr 1972 wurden noch rund 60 Tage unterschritten, seitdem liegen die Niedrigwasserdauern deutlich darunter, oft bei rund 20 Tagen und maximal bei 38 Tagen. Eine Tendenz zu einer Verschärfung von Niedrigwassersituationen am Rhein ist aus der zeitlichen Entwicklung der Niedrigwasserdauern nicht abzuleiten.

7.5 Beschreibung und Einordnung ausgewählter historischer Niedrigwasserereignisse (Beispiel: das Niedrigwasser August/September 2003)

Die Auswertungsergebnisse zu den historischen Niedrigwasserereignissen am Rhein mit Ganglinien und Kennwerten (Jährlichkeitseinordnungen für Abfluss und Dauer), d.h. die Episoden 1920, 1921, 1943, 1947, 1949, 1953, 1959, 1962, 1963, 1971, 1972, 1976, 1985, 2003, 2006, 2011 und 2015 befinden sich in der Anlage 2. In diesem Kapitel wird das Ereignis 2003, zu dem bei den Rheinanliegerstaaten umfassende Informationen vorliegen, ausführlich beschrieben. Zudem kann das Niedrigwasser 2003 als repräsentatives Ereignis für ein ausgeprägtes Sommerereignis mit hohen Wassertemperaturen angesehen werden. Im Kapitel 7.1 und 7.4 sind die Ganglinien, Kennwerte und Jährlichkeiten des 2003er Ereignisses grafisch und tabellarisch dargestellt.

Die Auswirkungen des Niedrigwassers 2003 sowie der sonstigen historischen Niedrigwasserereignisse, wurden erfasst und im allgemeinen Kapitel 6.3 zu den Auswirkungen integriert.

7.5.1. Meteorologische Entwicklung des Niedrigwassers 2003

Bevor das Jahr 2003 sich zu einem ausgesprochenen Trockenjahr entwickelte, begann es mit überdurchschnittlichen Niederschlägen (November 2002 bis Januar 2003). Ab Februar 2003 entwickelte sich dann über Westeuropa ein Hochdrucksystem, das feuchte westliche Luftmassen blockierte und die Zuführung von warmen, trockenen Luftmassen aus Nordafrika erlaubte. Das Resultat war ein deutlich ausgeprägtes Niederschlagsdefizit (insbesondere im Februar, März und August 2003) dessen Auswirkung in allen Rhein-anliegerstaaten ab Juli 2003 spürbar wurde. Diese Wetterlage führte zu Trockenheit und bis Oktober 2003 (dann wieder überdurchschnittliche Niederschläge) zu immer

spürbarerem und langanhaltendem Niedrigwasser. Eine meteorologische Trockenperiode verbunden mit einer Hitzewelle (besonders im August 2003) dehnte sich von März bis September 2003 über große Teile West-, Zentral- und Südeuropas aus. Als Folge der niedrigen Wasserstände und der intensiven Sonneneinstrahlung trat auch eine starke Erwärmung der Gewässer ein.

7.5.2. Hydrologische Entwicklung des Niedrigwassers 2003

Als Konsequenz der vorstehend beschriebenen Umstände und insbesondere des geringen Niederschlags entstand im Flusssystem des Rheins ab Ende Juni bzw. Anfang Juli 2003 bis Anfang Oktober 2003 (Zeitpunkt, bei dem die Flusspegel infolge der dann einsetzenden Niederschläge wieder steil anstiegen) eine Niedrigwasserperiode. Die niedrigsten Abflüsse waren Ende September 2003 zu verzeichnen. Auch wichtige, staugeregelte Nebenflüsse, beispielsweise Neckar, Main und Mosel wiesen niedrigere Abflüsse auf. Aufgrund der sommerlichen Schmelzwasserspeisung aus dem alpinen Einzugsgebietsanteil und des ausgleichenden Bodenseeeinflusses setzte die Niedrigwasserperiode am Rhein später ein als an den großen Nebenflüssen und an anderen Strömen (Elbe, Oder).

Als Folge der außerordentlich großen Wärme im Hochgebirge, die starkes Abschmelzen des Schnees und der Gletscher bewirkte, führten die Fließgewässer mit hochalpinem Einzugsgebiet (wie der Alpenrhein) aussergewöhnlich viel Wasser (Pegel Diepoldsau: kein Niedrigwasser im September 2003). Zentren der Trockenheit der Gewässer waren auf der Alpennordseite der Jura und das tiefere Mittelland (der Pegel Basel war stärker vom Niedrigwasser betroffen als Rekingen). Bereits im März/April 2003 sank der Abfluss im deutschen Teil des Rheins, dabei wurde aber der langjährige mittlere Niedrigwasserdurchfluss (MNQ_{1931/2000}) nicht vor Mitte August 2003 unterschritten. Zeitgleich mit den extrem hohen Lufttemperaturen Mitte August 2003 fiel der Wasserstand im Rhein bis zum letzten Septembertertel 2003 auf sehr niedrige Werte (z.B. 65 cm in Koblenz am 15. August 2003). Der geringste Rheinabfluss in den Niederlanden (Pegel Lobith) war 2003 dem von 1976 sehr ähnlich (rund 800 m³/s in Lobith) und führte ebenfalls zu ernsthaften Problemen, wobei im Jahr 1976 insgesamt drei Niedrigwasserperioden auftraten und es insgesamt zu einer größeren Niedrigwasserdauer kam.

Als Folge der niedrigen Wasserstände und der intensiven Sonneneinstrahlung trat eine starke Erwärmung der Gewässer ein. Mehrere Temperaturrekorde wurden gebrochen. Im Hochrhein wurden Temperaturen von bis zu 26°C, im Rest des Rheins 28 °C erreicht. In den Nebenflüssen stellte sich die Erwärmung in unterschiedlichem Maße ein. Die stauregulierten Flüsse (Mosel, Main, Neckar, Saar) waren beispielsweise stärker von der Erwärmung betroffen als frei fließende Nebenflüsse.

8. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse am Rhein

8.1 Ergebnisse aus vorliegenden Untersuchungen im Rheingebiet

Bisherige Auswirkungen des Klimawandels auf das Niedrigwasserabflussgeschehen am Rhein sind durch vielfältige anthropogene Eingriffe in den Wasserhaushalt nicht eindeutig festzumachen. Die Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse an den Rheinpegeln zeigt im 20. Jahrhundert eine Abmilderung der Niedrigwasserextreme. Nach Belz et al. (2007) zeigen die Pegel Basel, Maxau, Worms, Kaub, Andernach und Köln (nur Winterhalbjahr) über den Zeitraum 1901 bis 2000 einen zunehmenden Abflusstrend für NM7Q des hydrologischen Jahres oder des hydrologischen Winterhalbjahres. Bei Betrachtung des Zeitraumes 1951-2000 lässt sich der zunehmende Abflusstrend für die Pegel Basel, Maxau und Worms noch bestätigen, während für die übrigen stromab liegenden Pegel keine abgesicherten Trends vorliegen. Dafür sind die beobachteten abnehmenden NM7Q-Trends für die stromabwärts liegenden Nebengewässer Lahn und Mosel in diesem Zeitraum mit verantwortlich.

Aus mit Klimaprojektionen abgeleiteten Abflussprojektionen lassen sich durch systematische Vergleiche der Niedrigwasserkennwerte für einen Referenzzeitraum (1971-

2000) und einen Zukunftszeitraum (2021-2050 „nahe Zukunft“ oder 2071-2100 „ferne Zukunft“) die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserabflüsse ableiten und quantifizieren. Zu beachten ist dabei, dass Klimaszenarien auf verschiedenen Annahmen zur zukünftigen Emissionsentwicklung basieren und eine Vielzahl von globalen und regionalen Klimamodellen existiert, von denen per se keine zu bevorzugen ist. Aus den vorgenannten Gründen sind zur Abschätzung der Auswirkungen mehrere unterschiedliche Abflussprojektionen als „Ensemble“ auszuwerten und aus ihnen Bandbreiten der möglichen zukünftigen Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse abzuleiten.

In der **IKSR EG KLIMA** wurden Bandbreiten für die Änderung des NM7Q-Abflusses für das hydrologische Sommer- und Winterhalbjahr, basierend auf den Ergebnissen des KHR-Projekts **„Rheinblick 2050“** (Görgen et al. 2010), zusammengestellt.

Tabelle 16: Bandbreite zur Veränderung des NM7Q an verschiedenen Rheinpegeln (Quelle: IKSR-Fachbericht 188, IKSR, 2011)

Kennwert	Pegel	Szenarienkorridore	
		Änderung % Nahe Zukunft	Änderung % Ferne Zukunft
NM7Q hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)	Basel	-10% bis +10%	-20% bis -10%
	Maxau	-10% bis +10%	-20% bis -10%
	Worms	-10% bis +10%	-25% bis -10%
	Kaub	-10% bis +10%	-25% bis -10%
	Köln	-10% bis +10%	-30% bis -10%
	Lobith	-10% bis +10%	-30% bis -10%
NM7Q hydrologisches Winterhalbjahr (Nov-Apr)	Basel	+5% bis +15%	0% bis +15%
	Maxau	0% bis +10%	-5% bis +15%
	Worms	+5% bis +15%	-5% bis +15%
	Kaub	0% bis +15%	-5% bis +15%
	Köln	0% bis +15%	0% bis +20%
	Lobith	0% bis +15%	-5% bis +15%

Farbkodierung der Änderungssignale des 21. Jahrhunderts (Legende)

Orange	abnehmende Tendenz
Grau	keine eindeutige Tendenz
Blau	zunehmende Tendenz

Die Ergebnisse geben für die nahe Zukunft eine Bandbreite einer Abnahme um -10 % bis hin zu einer Zunahme um +10 % der NM7Q-Abflüsse für das hydrologische Sommerhalbjahr aus. Im hydrologischen Winterhalbjahr werden keine Veränderungen oder geringfügige Zunahmen (0 bis +5 %) bis zu einer generellen Zunahme um bis zu 15 % am Ende der Bandbreite für die Rheinpegel ausgewiesen. Für die ferne Zukunft verschieben sich die Auswirkungen tendenziell in Richtung geringere Niedrigwasserabflüsse, für das Sommerhalbjahr liegen die Bandbreiten komplett im negativen Änderungsbereich.

Bezüglich der künftigen Entwicklungen der Wassertemperaturen bei Sommerniedrigwasserereignissen hat die Untersuchung der **IKSR-Expertengruppe STEMP** (IKSR, 2014) ergeben, dass der Vergleich mittlerer August-Wassertemperaturen (stellvertretend für Sommer) über den Rhein-Längsschnitt zwischen dem Referenzzeitraum aus der damaligen Studien (2001–2010) und der nahen Zukunft (2021-2050) eine Zunahme der mittleren August-Wassertemperatur von etwa 1,5 °C zeigt, während in der fernen Zukunft (2071-2100) die Zunahme bei etwa 3,5 °C liegt. Diese Erwärmung ist ursächlich klimatisch bedingt, ohne Zusatzeffekt durch signifikante Wärmeeinleitungen⁶ (IKSR, 2015). Außerdem soll in der nahen Zukunft die ökologisch

⁶ Durch die zwischenzeitlich erfolgte Abschaltung mehrerer Kernkraftwerksblöcke im Rheineinzugsgebiet sind diese Aussagen bereits überholt. Verlässliche Prognosen über die Entwicklung der Wärmeeinleitungen könnten die Prognosen zur Wassertemperatur weiter verbessern. (IKSR, 2015)

kritische Anzahl der Tage mit Wassertemperaturen über 25 °C im Vergleich zur Referenz zunehmen, und zwar bei geringem Abfluss bis auf das Doppelte. Weiterhin werden in der fernen Zukunft die Tage mit Überschreitungen der 25 °C sowie 28 °C stark zunehmen. Diese Erkenntnisse zeigen, dass Niedrigwasserereignisse im Sommerhalbjahr (wie z.B. die aus den Jahren 2003 und 2006) künftig am Rhein hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen eine zunehmende Bedeutung erlangen könnten.

Nach dem Projekt **KLIWAS** (BMVBS, 2015) bewegt sich der Kennwert NM7Q in einer Ensembleuntersuchung für die Rheinpegel für die nahe Zukunft im Wasserwirtschaftsjahr (1.4. bis 31.3.) in einer Bandbreite zwischen -5% und bis +10%. In der fernen Zukunft bewegt sich die Bandbreite zu eher zurückgehenden Abflüssen im Bereich von -10 %/-20 % bis + 10 %. Hinsichtlich der Entwicklung von Niedrigwasserdauern wurde in KLIWAS die Veränderung des sogenannten Gleichwertigen Abflusses (GIQ) am Pegel Kaub (719 m³/s, ca. NM7Q5) untersucht. Während der GIQ am Pegel Kaub im Referenzzeitraum im Mittel um 18 Tage unterschritten wird, ergibt sich für die nahe Zukunft eine mögliche Spanne von 10 bis 25 Tagen, also zwischen leichter Abnahme und leichter Zunahme. Für die ferne Zukunft ist bei einer Bandbreite von 15 bis 50 Tagen doch eher von einer deutlichen Zunahme der Anzahl der Unterschreitungstage auszugehen.

Im Arbeitskreis **KLIWA** wurden basierend auf dem Regionalmodell COSMO-CLM4.8 und dem Emissionsszenario A1B für die nahe Zukunft im hydrologischen Jahr für 3 Modellruns durchgehend abnehmende Niedrigwasserkennwerte ermittelt (vgl. Tab. 17) (HYDRON, 2017).

Tabelle 17: Veränderungen der Niedrigwasserverhältnisse für die nahe Zukunft am Pegel Kaub (Abflussveränderung in %, Dauerveränderung in Tagen)

	MNQ	MNM7Q	MNM21Q	maxD < MNQ	sumD < MNQ
run1	-8,9 %	-8,8 %	-9,2 %	+ 12,6 d	+ 17,8 d
run2	-8,9 %	-9,0 %	-8,7 %	+ 6 d	+ 4,6 d
run3	-4,0 %	-4,4 %	-6,2 %	+ 8,1 d	+ 10,1 d

Diese Ergebnisse stellen allerdings keine Modelbandbreite im Sinne der Verwendung mehrerer unterschiedlicher Modellketten dar, sondern zeigen die Variation einer Modellkette bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen auf. Für diese Abflussprojektionen ergeben sich am Pegel Kaub Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse zwischen 5 und 10 %. Die Unterschreitungsdauern unter dem hier benutzten Schwellenwert MNQ nehmen zwischen 5 und 17 Tagen zu. Diese Veränderungen resultieren im Wesentlichen aus deutlichen Veränderungen im hydrologischen Sommerhalbjahr (NM7Q-Abnahmen zwischen -5 und -13 %). Für das hydrologische Winterhalbjahr ergeben sich je nach Run sowohl Abnahmen des NM7Q (Run2: -7,2 %) als auch minimale Veränderungen (Run1: -1,2 %, Run3: 0,4 %).

8.2 Untersuchung der Abflussprojektionen COSMO-CLM4.8-A1B

Da eine Zunahme der Niedrigwasserabflüsse unkritisch ist, wurde aus der Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen die COSMO-CLM4.8 Abflussprojektion, die zurückgehende Niedrigwasserabflüsse prognostiziert, als eine hinsichtlich der Auswirkungen ungünstige Variante zur Beschreibung möglicher Folgewirkungen weiter untersucht. Um eine direkte Vergleichbarkeit mit der Untersuchungsmethodik in der EG LW zu erreichen, wurden diese Abflussprojektionen - bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr und mit Ermittlung von Wiederkehrintervallen - ausgewertet. Da alle drei Runs gleich wahrscheinlich sind, wurden sie als Gesamtkollektiv für die nahe Zukunft (2021-2050) betrachtet und ausgewertet (vgl. Tab. 18).

Tabelle 18: Niedrigwasserkennwerte zur Abflussprojektion COSMO-CLM4.8-A1B

Modellprojektionen COSMO-CLM4.8-A1B: NM7QT , Abflüsse in [m ³ /s]						
Jährlichkeit:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	MNM7Q
Worms/Rhein 1971-2000 simuliert	748	643	595	558	520	762
Worms/Rhein 2021-2050 simuliert	696	581	529	489	446	711
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	-7 %	-10 %	-11 %	-12 %	-14 %	-7 %
Kaub/Rhein 1971-2000 simuliert	909	765	700	651	599	929
Kaub/Rhein 2021-2050 simuliert	826	684	620	572	521	846
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	-9 %	-11 %	-11 %	-12 %	-13 %	-9 %
Köln/Rhein 1971-2000 simuliert	1077	894	810	746	679	1101
Köln/Rhein 2021-2050 simuliert	972	792	709	647	581	996
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	-10 %	-11 %	-12 %	-13 %	-14 %	-10 %

Die MNM7Q-Werte nehmen nach diesem Szenario in der nahen Zukunft (2021-2050) flussabwärts von Worms (-7 %) über Kaub (-9 %) bis Köln (-10 %) zunehmend ab. Die n-jährlichen NM7Q-Werte, die in Kap. 9.1 als Niedrigwasserabfluss-Schwellenwerte definiert werden, zeigen für alle Pegel sehr ähnliche Veränderungen mit Abnahmen um -10 % für ein 5-jährliches NM7Q bis -14 % für ein 50-jährliches NM7Q.

Zur Betrachtung der Änderung der maximalen zusammenhängenden Unterschreitungsdauern MaxD kleiner als der Schwellenwert NM7Q2 sind in Tabelle 19 die Anzahl der Tage, an dem der in dem Referenzzeitraum ermittelte NM7Q2 in einem Niedrigwasserereignis unterschritten wurde, für unterschiedliche Jährlichkeiten aufgeführt.

Bei insgesamt zurückgehenden Niedrigwasserabflüssen ergeben sich bei Anhaltung des Schwellenwertes NM7Q2 aus dem Referenzzeitraum erwartungsgemäß längere Unterschreitungsdauern dieses Schwellenwertes. Während für ein mittleres 2-jährliches Ereignis im Modellreferenzzeitraum lediglich 4 Unterschreitungstage vorkommen, steigen diese im Zukunftsszenario auf 11 bis 13 Tage stark an. Für die selteneren Ereignisse eines 5 bis 20-jährlichen Ereignisses nehmen die Unterschreitungstage noch um die Hälfte bis zu Dreiviertel im Vergleich zum Referenzzeitraum zu.

Tabelle 19: Modellprojektion Unterschreitungsdauer MaxD < NM7Q2 in Tagen

Modellprojektion COSMO-CLM4.8-A1B: Unterschreitungsdauer MaxD < NM7Q2(IST) in [Tagen]					
Jährlichkeit:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a
Worms simuliert 1971-2000 < 748 m ³ /s	4	22	37	47	61
Worms simuliert 2021-2050 < 748 m ³ /s	11	33	55	76	
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	184 %	52 %	49 %	62 %	
Kaub simuliert 1971-2000 < 909 m ³ /s	4	24	39	51	62
Kaub simuliert 2021-2050 < 909 m ³ /s	13	37	61	80	
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	253 %	54 %	55 %	58 %	
Köln simuliert 1971-2000 < 1077 m ³ /s	4	23	37	46	54
Köln simuliert 2021-2050 < 1077 m ³ /s	13	38	58	81	
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	260 %	63 %	57 %	77 %	

Es werden die in der gesamten Studie angewandten Methoden und Zeitintervalle verwendet, so dass die Auswirkungen mit den übrigen Ergebnissen ins Verhältnis gesetzt werden können. Die Ergebnisse stehen für eine Projektion mit leichten Abnahmen in den Niedrigwasserkennwerten (Abnahme um -4 bis -9 % für das MNQ des hydrologischen Jahres vgl. Kap. 8.1), während in den Bandbreiten von anderen Untersuchungen auch Projektionen mit Abflusszunahmen in der nahen Zukunft vorkommen.

8.3 Zu berücksichtigende Auswirkungen unter dem Aspekt der Niedrigwasservorsorge

Aus den vorliegenden Untersuchungen ergibt sich für Niedrigwasserkenngrößen in der nahen Zukunft eine Bandbreite von Abnahmen um -5 % bis Zunahmen um 10 % bei Betrachtung des Wasserhaushaltsjahres 1.April bis 31.März. Änderungsprozente für hydrologische Jahre und Halbjahre aus anderen Bandbreiten können nicht direkt verglichen werden, da sie dem Niedrigwasserregime am Rhein nicht entsprechen. Bei Verwendung des hydrologischen Jahres oder des hydrologischen Sommer-/Winterhalbjahrs werden die am Rhein typischen Niedrigwasserperioden von September bis Dezember unterbrochen und nicht als ein ganzes Ereignis erfasst. Es ist nicht eindeutig klar, ob die Niedrigwasserabflüsse schon in der nahen Zukunft abnehmen oder erst in der fernen Zukunft. Für die nahe Zukunft muss im Sinne einer

Vorsorgebetrachtung von dem ungünstigeren Fall der moderaten Abnahme der Niedrigwasserabflüsse in der Größenordnung von 5 bis 10 % ausgegangen werden. Die Auswirkungen eines solchen Szenarios wurden untersucht und ergeben Abnahmen der T-jährlichen Niedrigwasserwerte NM7QT um 7 % bis 14 %. Die damit einhergehende Verdreifachung der Unterschreitungsdauern ist für ein häufiges 2-jährliches Ereignis sehr hoch, während für seltenere 5- bis 20-jährliche Ereignisse die Unterschreitungsdauern um die Hälfte bis um ein Dreiviertel zunehmen.

Die hier aufgeführten Ergebnisse stellen ein Bild einer möglichen Zukunft auf der Grundlage der Annahmen bzw. Ausgangspunkte, die für die Analyse gewählt wurden dar. Andere Abflussprojektionen könnten zu anderen Ergebnissen führen.

9. Niedrigwasser-Monitoring

Die Überwachung des Eintretens von Niedrigwasser oder auch die Untersuchung historischer Abflussreihen hinsichtlich des Auftretens von Niedrigwasser bedarf Schwellenwerte um den Niedrigwasserfall zu definieren und ggf. in seiner Ausprägung zu klassifizieren.

9.1 Ableitung einer Klassifizierung von Niedrigwasserverhältnissen

Von Niedrigwasser spricht man, wenn der aktuelle Abfluss einen für das Gewässer typischen Schwellenwert unterschritten hat. Dabei können feste Schwellenwerte, bei denen es sich meist um langjährige MNQ oder ähnliche Kennwerte handelt, oder zeitlich variable (i.d.R. monatliche) Kennwerte als jeweiliger Vergleichswert herangezogen werden. Um das Ausmaß des vorliegenden Niedrigwassers zu differenzieren, werden abgestufte Schwellenwerte benötigt, mit denen dann das Ereignis Niedrigwasser von „normal“ bis hin zu „extrem“ klassifiziert werden kann. Um eine synoptische Übersicht der untersuchten Pegel am Rhein abbilden zu können, werden NM7Q-Werte für unterschiedliche Wiederkehrintervalle bezogen auf die langjährigen Referenzzeitreihen (1961-2010) der jeweiligen Pegel für die Klassifizierung von Niedrigwasserverhältnissen herangezogen. In Tabelle 20 sind die ausgewählten Niedrigwasserklassen hinsichtlich ihrer Ausprägung und Beschreibung sowie einer Farblegende zur Darstellung von Unterschreitungen bestimmter Niedrigwasserschwellenwerte aufgeführt.

Tabelle 20: Festlegung von Niedrigwasserklassen

Farbe	Klasse	Ausprägung	Bezeichnung
grün	0	$\geq \text{NM7Q}(T2)$	normal = kein NW
gelb	1	$< \text{NM7Q}(T2)$	häufiges NW
orange	2	$< \text{NM7Q}(T5)$	weniger häufiges NW
rot	3	$< \text{NM7Q}(T10)$	seltene NW
violett	4	$< \text{NM7Q}(T20)$	sehr seltene NW
schwarz	5	$< \text{NM7Q}(T50)$	extrem seltene NW

(abgestimmt mit den IKSMS)

Normale Niedrigwasserabflüsse liegen vor, solange der jeweilige 2-jährliche NM7Q noch nicht unterschritten ist. Bei Unterschreitung dieses ersten Schwellenwertes wird die Klasse „häufiges Niedrigwasser“ erreicht, solange die Abflüsse ein 5-jährliches NM7Q nicht unterschreiten. Treten Abflüsse in der Klasse kleiner NM7Q(T5) bis NM7Q(T10) auf, so wird die Situation als „weniger häufiges Niedrigwasser“ bezeichnet. Bei Unterschreitung eines 10-jährlichen NM7Q tritt ein „seltene Niedrigwasser“, bei Unterschreitung eines 20-jährlichen NM7Q ein „sehr seltene Niedrigwasser“ auf. Die höchste Niedrigwasserkategorie „extrem seltene Niedrigwasser“ ist bei Unterschreitung eines 50-jährlichen NM7Q-Abflusses am jeweiligen Pegel erreicht. Diese Klassifizierung wurde nach erfolgter Abstimmung mit der IKSMS festgelegt, so dass beispielsweise beim Niedrigwasser-Monitoring an der Mosel durch die IKSMS Klassifizierungen verwendet werden, wie sie am Rhein zum Einsatz kommen. Die entsprechenden statistischen Untersuchungen zur Ableitung der für die Schwellenwerte benötigten Kennwerte erfolgte in Kap. 7.3.2. Dort sind in den Tabellen 8 bis 12 die erforderlichen NM7Q(T)-Werte für die Rheinpegel aufgeführt.

Auf eine implizite Verknüpfung der Niedrigwasserschwellenwerte mit unterschrittenen Niedrigwasserdauern wurde verzichtet, um die Schwellenwerte einfach und verständlich zu halten. Nichts desto trotz erscheint es sinnvoll, bei einem Monitoring zusätzlich zur erreichten Niedrigwasserkategorie auch die bisherige Niedrigwasserunterschreitungsdauer (in Tagen) mit zu verfolgen.

9.2 Validierung der Niedrigwasserklassifizierung mittels der historischen Zeitreihen

Mittels der im vorangegangenen Kapitel festgelegten Niedrigwasserklassifizierung wurden die historischen Zeitreihen der Pegel einem „retrospektiven Monitoring“ unterzogen.

In Abbildung 18 ist beispielhaft für die Pegel Basel, Kaub und Lobith das jährliche Auftreten dieser Niedrigwasserklassen mit Andauern der Unterschreitungstage dargestellt. Die in Kap. 7.1 und Anlage 2 beschriebenen historischen Niedrigwasserereignisse können mit diesem Monitoring noch deutlicher nachvollzogen werden, weitere bislang nicht beschriebene Ereignisse werden erkennbar. Die Ergebnisse für alle Untersuchungspegel sind in Anlage 4 aufgeführt. Deutlich zu erkennen sind die hohen Niedrigwasserklassen und die insgesamt deutlich längeren Niedrigwasserereignisse in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts. An nahezu allen Pegeln treten die Ereignisse von 1920/1921, von 1946-1949, 1962 und 1971 deutlich hervor. An den Pegeln Basel und Kaub wird im Gesamtzeitraum dreimal, am Pegel Lobith viermal die Klasse 5 „extrem seltenes Niedrigwasser“, allerdings bei unterschiedlichen Ereignissen, erreicht. Dies ist dem unterschiedlichen Abflussregime dieser Pegel zuzuschreiben. Die Klasse 4 „sehr seltenes Niedrigwasser“ wird am Pegel Basel in 6 Jahren, am Pegel Kaub in 8 Jahren und am Pegel Lobith in 7 Jahren erreicht. Während am Pegel Basel Gesamtunterschreitungsdauern von 140 Tagen in 3 Jahren erreicht werden, werden am Pegel Kaub in 4 Jahren 140 Tage deutlich überschritten und davon in 2 Jahren sogar 180 Tage. Am Pegel Lobith werden 140 Tage auch dreimal übertroffen, im Jahr 1921 wurden sogar insgesamt 215 Tage erreicht. Seit Mitte der 1970-iger Jahre sind die Niedrigwasserereignisse weniger stark ausgeprägt, am Pegel Basel wird im Jahr 2005 einmal die Klasse 3 „seltenes Niedrigwasser“ ($T < 10$ bis 20a) erreicht, am Pegel Kaub ist dies zweimal der Fall (1985 und 2003), am Pegel Lobith wird die Klasse 3 in den Jahren 1991 und 2003 erreicht. Nach dem deutlich wahrgenommenen Ereignis aus 2003 können am Pegel Kaub noch 4 Jahre mit Erreichen der Klasse 2 „weniger häufiges Niedrigwasser“ festgestellt werden.

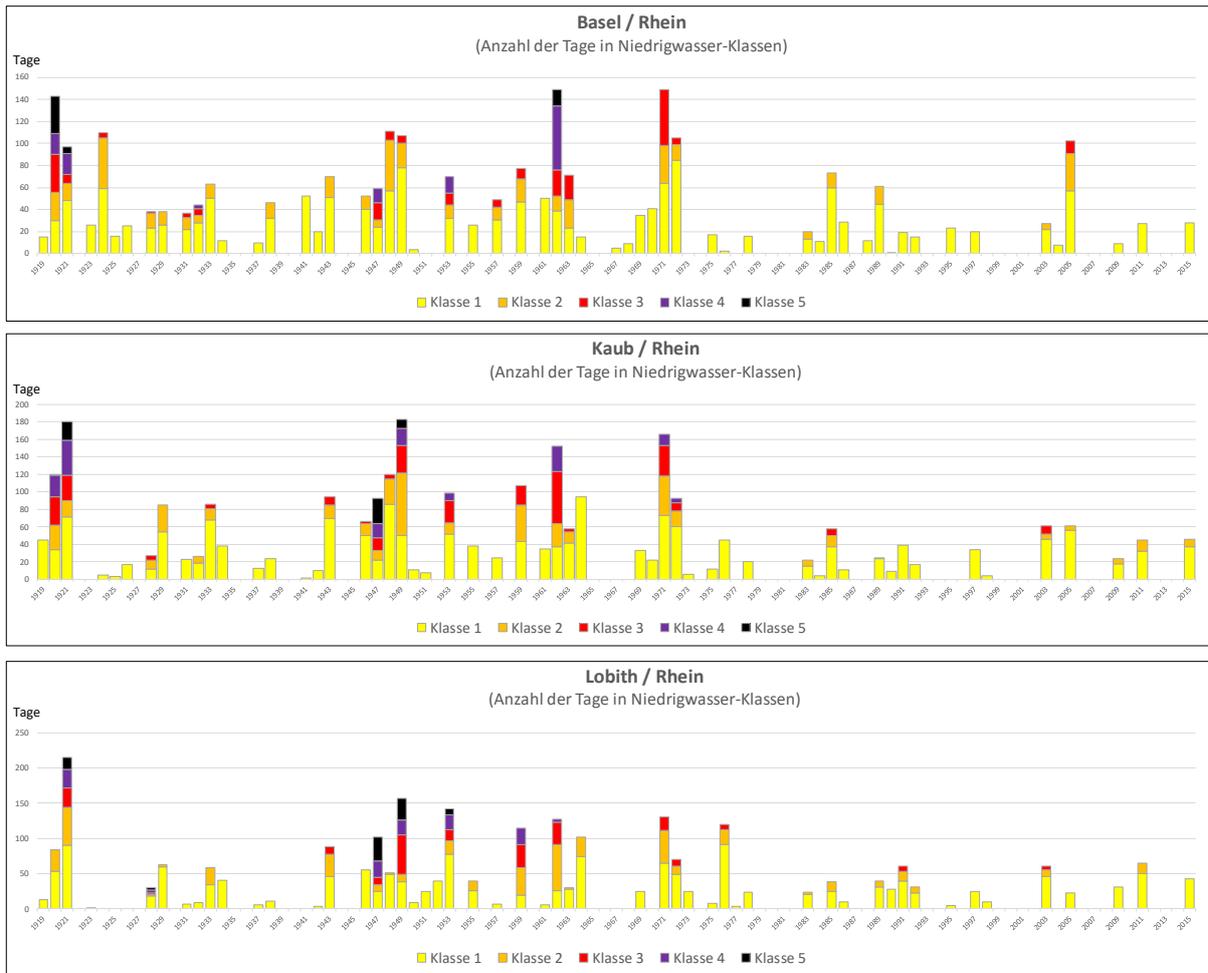


Abbildung 18: Retrospektives Monitoring an den Pegeln Basel, Kaub und Lobith

In Tabelle 21 bis 23 ist die jährliche mittlere Anzahl der Tage mit Abflüssen in den definierten Niedrigwasserklassen für unterschiedliche Dekaden und Teilzeiträume gegenübergestellt.

Tabelle 21: Mittlere jährliche Niedrigwassertage Pegel Basel

Jahr	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
1921 - 1930	22,3	8,8	1,4	1,9	0,6
1931 - 1940	15,4	4,5	1,0	0,3	0,0
1941 - 1950	32,6	10,6	3,0	1,3	0,0
1951 - 1960	13,6	4,4	2,7	1,5	0,0
1961 - 1970	21,7	3,9	4,6	5,8	1,5
1971 - 1980	18,4	4,8	5,7	0,0	0,0
1981 - 1990	17,1	3,6	0,0	0,0	0,0
1991 - 2000	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0
2001 - 2010	9,6	3,9	1,1	0,0	0,0
1921 - 2010	17,6	4,9	2,2	1,2	0,2
1921 - 1960	21,0	7,1	2,0	1,3	0,2
1961 - 2010	14,9	3,2	2,3	1,2	0,3

Tabelle 22: Mittlere jährliche Niedrigwassertage Pegel Kaub

Jahr	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
1921 - 1930	16,2	6,0	3,4	4,0	2,1
1931 - 1940	18,5	2,0	0,5	0,0	0,0
1941 - 1950	30,1	14,1	6,2	3,6	3,9
1951 - 1960	16,6	5,5	4,7	0,9	0,0
1961 - 1970	26,3	3,9	6,3	2,9	0,0
1971 - 1980	21,6	6,3	4,5	1,8	0,0
1981 - 1990	10,0	2,1	0,8	0,0	0,0
1991 - 2000	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0
2001 - 2010	12,0	1,7	0,9	0,0	0,0
1921 - 2010	17,9	4,6	3,0	1,5	0,7
1921 - 1960	20,4	6,9	3,7	2,1	1,5
1961 - 2010	15,9	2,8	2,5	0,9	0,0

Tabelle 23: Mittlere jährliche Niedrigwassertage Pegel Lobith

Jahr	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
1921 - 1930	17.0	6.0	2.9	3.1	2.0
1931 - 1940	10.8	2.4	0.0	0.0	0.0
1941 - 1950	22.6	5.3	7.8	4.4	6.5
1951 - 1960	19.5	7.1	4.8	4.5	0.8
1961 - 1970	15.9	9.5	3.2	0.4	0.0
1971 - 1980	26.6	7.9	3.6	0.0	0.0
1981 - 1990	11.5	2.4	0.0	0.0	0.0
1991 - 2000	10.2	2.2	0.8	0.0	0.0
2001 - 2010	10.0	0.9	0.6	0.0	0.0
1921 - 2010	16.0	4.9	2.6	1.4	1.0
1921 - 1960	17.5	5.2	3.9	3.0	2.3
1961 - 2010	14.8	4.6	1.6	0.1	0.0

Aus den Tabellen 21 bis 23 lässt sich die Variation für die mittleren Unterschreitungsdauern in den Dekaden erkennen, die für die Pegel überwiegend übereinstimmt. Die 1940-iger Jahre waren mit Abstand die ausgeprägteste Niedrigwasserdekade. Es traten in diesem Jahrzehnt in Basel und Kaub an rund 300 Tagen Abflüsse der Klasse 1 auf, in Lobith waren es 226 Tage. Während in Basel 106 Tage in der Klasse 2 auftraten, waren es in Kaub 141 Tage, in Lobith waren es lediglich 53 Tage. In der Niedrigwasserklasse 3 bis 5 traten dann in Kaub mit 137 Tagen deutlich mehr Tage als in Basel (43 Tage) auf, in Lobith waren es sogar 187 Tage. Das Jahrzehnt mit den deutlich wenigsten Niedrigwassern waren die 1990-iger Jahre. In Basel traten in diesem Jahrzehnt 77 Tage der Klasse 1 auf (Kaub 94 Tage, Lobith 102 Tage), die Klasse 2 wurde in Basel und Kaub nicht erreicht, in Lobith dagegen an 22 Tagen. In Lobith wurde in den 1990-iger Jahren sogar die Klasse 3 an 8 Tagen erreicht, dort war die Dekade von 2001 bis 2010 noch niedrigwasserärmer als die 1990-iger Jahre.

Der Vergleich des Teilzeitraums 1921-1960 mit der Referenzperiode 1961-2010 verdeutlicht insbesondere auch für die selteneren Niedrigwasserklassen 2 bis 5 an den Pegeln Kaub und Lobith den Rückgang der aufgetretenen Niedrigwassersituationen in der aktuelleren Referenzperiode.

Die Überprüfung der festgelegten Niedrigwasserschwellenwerte bzw. Niedrigwasserklassen durch Vergleich mit den historischen Ereignissen bestätigt die Angemessenheit dieser Schwellenwerte. Die Niedrigwasserschwellenwerte sind sensitiv genug, um auch kleinere aber häufigere Ereignisse der letzten 40 Jahre zu detektieren und dennoch verschiedene Niedrigwasserausprägungen zu differenzieren. Auf der anderen Seite werden die festgelegten Niedrigwasserklassen auch den großen historischen Ereignissen gerecht, diese werden naturgemäß seltener erreicht, ragen aber insbesondere durch die Darstellung der Gesamtdauern der Niedrigwasserunterschreitungstage aus dem Gesamtkollektiv heraus.

Demnach kann die Eignung der festgelegten Niedrigwasserschwellenwerte für ein zukünftiges Monitoring bestätigt werden. Dabei sollten allerdings neben den Niedrigwasserabflüssen auch die Anzahl der zusammenhängenden Unterschreitungstage verfolgt werden.

10. Schlussfolgerungen

Niedrigwasser-Abflussregime des Rheins

Für das natürliche Niedrigwasserabflussgeschehen sind die quantitativen Anteile aus unterschiedlichen Teileinzugsgebieten des Rheins von Bedeutung. Die pegelbezogene Analyse von Abflusswerten für einige Messstellen längs des Rheins verdeutlicht auch für den Niedrigwasserbereich des gesamten Rheinverlaufs die Bedeutung des Abflussanteils aus dem Alpen- und Voralpengebiet. Zudem sorgt das sich ändernde Abflussregime mit winterlichem Minimum im nivalen Bereich (bis Basel) und sommerlichem Minimum im pluvialen Bereich (unterhalb Worms) für eine gewisse Resilienz gegenüber extremen Niedrigwasserereignissen für den gesamten Rhein.

Die historischen Niedrigwasserereignisse treten längs des Rheinverlaufs insbesondere bei extremen Ereignissen in unterschiedlichem Ausmaß auf. Dabei können sich 100-jährliche Ereignisse am südlichen Oberrhein (Basel) bis zu einem 15-jährlichen Ereignis in Lobith abmildern (Ereignis März-Mai 1921). Andererseits traten Ereignisse moderater Jährlichkeit in Basel (10 – 40-jährlich) auf, die sich stromab zu bis zu über 100-jährlichen Ereignissen am Niederrhein entwickelten (Ereignisse 1947 und 1949). Eher einheitliche Ausprägungen zeigen die kleineren Niedrigwasserereignisse der neueren Zeit (1971: 20 – 30-jährlich; 1976: 2 – 5-jährlich; 1985: 10-jährlich; 2003: 5 – 20-jährlich; 2011: 10-jährlich; 2015: 5 – 10-jährlich).

Niedrigwasserbeeinflussungen

Nach der Bestandsaufnahme zu bestehenden Abflussbeeinflussungen auf den Niedrigwasserabfluss im Rhein ergibt sich bezüglich der Zu- und Ableitungen eine positive Bilanz. Darüber hinaus führt vor allem die Beeinflussung durch die Speicherbewirtschaftung im Alpenraum seit den 1960-iger – 1970-iger Jahren zu signifikant erhöhenden Niedrigwasserabflüssen für die niedrigsten Niedrigwasser, die entsprechend des Abflussregimes am Rhein im Winterhalbjahr auftreten. Seit Mitte der 1990-iger Jahre wird Wasser aus dem Donau-Einzugsgebiet dem Main zugeführt (Überleitungssystem 1999 fertiggestellt). Insgesamt überwiegen positive Beeinflussungen auf das Niedrigwasserabflussgeschehen am Rhein.

Betroffenheiten

Nach der Bestandsaufnahme zu bestehenden Betroffenheiten durch Niedrigwasser ergeben sich vielfältige ökonomische Auswirkungen, die jedoch schwer quantifizierbar sind. Grenzüberschreitend ist die Schifffahrt mit den von ihr abhängigen Personen und Wirtschaftsbereichen betroffen. Mit zurückgehendem Abfluss können Wasserkraftwerke nur geringere Strommengen erzeugen. Ökologische Beeinträchtigungen ergeben sich insbesondere für sommerliche Niedrigwasser. Insbesondere in den regionalen Wassersystemen des Deltarheins besteht bei Niedrigwasser am Rhein zudem die Gefahr der Salzwasserintrusion, außerdem können dort befindliche Torfdeiche bei Niedrigwasser instabil werden.

Untersuchung historischer Abflussreihen

Gemäß der Auswertung historischer Abflussreihen waren Niedrigwasser am Rhein in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts deutlich ausgeprägter und traten mit geringeren Abflüssen und längeren Unterschreitungsauern als in den letzten 50 Jahren auf. Hinsichtlich der Niedrigwasserabflüsse lässt sich für den Rhein von Diepoldsau bis Andernach ein signifikant zunehmender Trend für den Gesamtzeitraum von 1901 bis 2010 feststellen. Dieser Trend ist überwiegend dem Einfluss der Speicherbewirtschaftung im Alpenraum zuzuschreiben. Auch die im 20. Jahrhundert für das Rheineinzugsgebiet zunehmende Tendenz der Jahresniederschläge kann einen Anteil daran haben. Für den Zeitraum ab 1961 bis 2010 lassen sich keine Trends für die Niedrigwasserabflüsse detektieren. Die aktuelle Wahrnehmung von Niedrigwasserereignissen wird einerseits durch die lange Abwesenheit von bedeutenden Niedrigwasserereignissen und andererseits durch angestiegene Betroffenheiten beeinflusst.

Basierend auf einer eingehenden Analyse der historischen Abflussreihen wurden für den Rhein in Abstimmung mit den Internationalen Kommissionen zum Schutz der Mosel und der Saar (IKSMS) abflussbezogene Schwellenwerte zur Klassifizierung der Niedrigwassersituation in fünf Ausprägungsstufen von „normal“ bis „extrem seltenes Niedrigwasser“ abgeleitet. Die Eignung dieser Klassifizierung, die eine differenzierte Einordnung der Niedrigwasserereignisse liefert, wurde über die Anwendung auf die historischen Abflusszeitreihen validiert. Extremereignisse können klar von kleineren Ereignissen abgegrenzt werden, wobei jedoch eine ausreichende Sensitivität gegenüber kleineren Niedrigwasserereignissen gegeben ist.

Mögliche zukünftige Auswirkungen durch den Klimawandel

Die Bandbreite der Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse infolge des Klimawandels reicht in vorliegenden Abflussprojektionen für den Zeitraum 2021-2050 für den Rhein von Abnahmen um 10 % bis zu Zunahmen um 10 % und lässt keine eindeutige Entwicklung erkennen. Für die ferne Zukunft (2071-2100) weisen die Abflussprojektionen für das hydrologische Sommerhalbjahr übereinstimmend deutliche Niedrigwasserabflussminderungen aus.

Für ein pessimistisches Szenario mit Niedrigwasserabnahmen um 5 bis 10 % des MNM7Q (langjähriger mittlerer Niedrigwasserabfluss an 7 aufeinanderfolgenden Tagen) für den Zeitraum 2021-2050 ergeben sich mit zunehmender Jährlichkeit größere Abnahmen von 7 bis zu 14 % für 2- bis 50-jährliche Niedrigwasserabflüsse. Mit der Abflussabnahme geht eine deutliche Verlängerung der Niedrigwasserdauer einher.

Niedrigwasserereignisse im Sommerhalbjahr könnten künftig am Rhein insbesondere hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen eine zunehmende Bedeutung erlangen. Bei niedrigen Abflüssen können die Wassertemperaturen im Sommer stärker ansteigen. Beispiel dafür sind die Niedrigwasserereignisse 2003 und 2006. Nach Untersuchungen der IKSR-Expertengruppe STEMP ist mit einer Zunahme der sommerlichen Wassertemperaturen am Rhein um 1,5 °C für die nahe Zukunft und über 3 °C für die ferne Zukunft zu rechnen. Dies bedeutet für die nahe und ferne Zukunft, insbesondere bei geringem Abfluss, eine Zunahme der Tage mit Wassertemperaturen über 25 °C (ökologisch kritischer Schwellenwert) im Rhein.

Literatur

Arbeitskreis KLIWA (2009): Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Bericht 14

Arbeitskreis KLIWA (2017): Seite und Projekt über Niedrigwasser-Anpassung (*Bericht wird voraussichtlich Ende 2017 publiziert*). <http://www.kliwa.de/hydrologie-niedrigwasser-anpassung.htm>

Beijk, V. (2017): Focus on fresh water supply in the Dutch Rhine Delta. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_5_fresh_water_supply_in_the_dutch_delta_-_vincent_beijk_rws.pdf

Belz, J. (2005): Niedrigwasser-Abflüsse im Rheingebiet im 20. Jahrhundert – Veränderungen und Ursachen. – In: BfG-Veranstaltungen 5/2005 „Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung“, Koblenz 2005

Belz, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., Mendel, H. G., Meuser, A., Müller, G., Pfister, L. Plonka, B. und W. van Vuuren (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. KHR-Bericht Nr. I-22, ISBN 978-90-70980-33-7.

BMVI (Hrsg.) (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI. Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/kliwas-abschlussbericht-des-bmvi-2015-03-12.pdf>

Buck, W.; K. Felkel; H. Gerhard; H. Kalweit; J. van Malde; K.-R. Nippes; B. Ploeger und W. Schmitz (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen - Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. KHR-Berichte I-11. ISBN 90-70980-17-7.

BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) (2016): Informationsplattform Undine (u.a. Seite „Extremereignisse Rhein: Hochwasser, Niedrigwasser“). <http://undine.bafg.de/>

BY- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (Hrsg.) (2016): Niedrigwasser- Informationsdienst Bayern (NID). <https://www.nid.bayern.de/>

BY- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (Hrsg.) (2016): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen.

Cammalleri, C. (2017): Drought monitoring and assessment at EU level through a novel low-flow index. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_3_3_cammalleri_chr_sep2017.pdf

DROUGHT-R&SPI (2015): Fostering European Drought Research and Science-Policy Interfacing. <http://www.eu-drought.org/>

DVWK (1983): Niedrigwasseranalyse, Teil I: Statistische Untersuchung des Niedrigwasser-Abflusses. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. – Regeln zur Wasserwirtschaft, 120.

DVWK (1992): Niedrigwasseranalyse, Teil II: Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflussdefizits. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. – Regeln zur Wasserwirtschaft, 121.

EEA (2009): Water resources across Europe – confronting water scarcity and drought. <https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe>

EU-Kommission (2007): Mitteilung der Kommission - Antworten auf die Herausforderung von Wasserknappheit und Dürre in der Europäischen Union (KOM/2007/0414).

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52007DC0414> sowie http://ec.europa.eu/environment/water/adaptation/index_en.htm

EU-Kommission (2008): Technical Report 023 - Drought management plan report including agricultural, drought indicators and climate change aspects (Water scarcity and droughts expert network)

http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/dmp_report.pdf

EU-Kommission (2012): Strategy for Water Scarcity and Droughts (policy review part of the "Blueprint to safeguard European waters").

http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm

und

Mitteilung der Kommission - Bericht über die Überprüfung der EU-Strategie zur Bekämpfung von Wasserknappheit und Dürren (COM/2012/0672 final). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52012DC0672&from=EN>

EU-Kommission (2009): Technical Report - 040 – Guidance document No. 24 Common Implementation Strategy (CIS) for the WFD (2000/60/EC) River basin management in a changing climate https://circabc.europa.eu/sd/a/a88369ef-df4d-43b1-8c8c-306ac7c2d6e1/Guidance%20document%20n%2024%20-%20River%20Basin%20Management%20in%20a%20Changing%20Climate_FINAL.pdf

Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, de Keizer, O., M., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. und D. Volken (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the River Rhine Basin. Results of the RheinBlick2050 project. KHR-Bericht Nr. I-23, ISBN 978-90-70980-35-1.

HYDRON (2015): Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM Daten Version 4.8 run 2 und 3 für das Rhein-Einzugsgebiet vom Pegel Worms bis zum Pegel Köln. Bericht (unveröff.) im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz und dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie.

HYDRON (2017): Auswertungen zur zukünftigen Veränderung der Niedrigwassersituation in Rheinland-Pfalz. Bericht (unveröff.) im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz.

IKSE (2017): „Hydrologische Auswertung der Niedrigwassersituation 2015 im Einzugsgebiet der Elbe“. http://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user_upload/D/06_Publikationen/07_Verschiedenes/2017_IKSE-NW-2015.pdf

IKSMS (2009-2013): Grenzüberschreitendes Projekt "Hoch- und Niedrigwassermanagement im Mosel- und Saareinzugsgebiet - FLOW MS" (Flood = Hochwasser, LOW water = Niedrigwasser, Mosel und Saar). <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/60264/>

IKSMS (2014): Bericht der IKSMS-AG IH zur Bestandsaufnahme "Niedrigwasserproblematik". <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/411/Bericht%20Niedrigwasserproblematik.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht%20Niedrigwasserproblematik.pdf> (Hinweis: Ein neuer Bericht wird 2018 erwartet.)

IKSR (2004): Wärmebelastung der Gewässer im Sommer 2003 Zusammenfassung der nationalen Situationsberichte. IKSR-Fachbericht Nr. 142. <https://www.iksr.org/>

IKSR (2006): Maßnahmen bezogen auf die Wärmebelastung des Rheins in extremen Hitze- und Trockenperioden: Überblick und Zusammenstellung der Länderberichte. IKSR-Fachbericht Nr. 152. <https://www.iksr.org/>

IKSR (2011): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. IKSR-Fachbericht Nr. 188. <https://www.iksr.org/>

IKSR (2012): Niedrigwasserperioden 2011 im Rheineinzugsgebiet. IKSR-Fachbericht Nr. 198. <https://www.iksr.org/>

IKSR (2013a): Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011. IKSR-Fachbericht Nr. 209. <https://www.iksr.org/>

IKSR (2013b): Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen von Änderungen des Abflussgeschehens und der Wassertemperatur auf das Ökosystem Rhein und mögliche Handlungsperspektiven. IKSR-Fachbericht Nr. 204. <https://www.iksr.org/>

IKSR (2014): Abschätzungen der Folgen des Klimawandels auf die Entwicklung zukünftiger Rheinwassertemperaturen auf Basis von Klimaszenarien – Kurzbericht. IKSR-Fachbericht Nr. 213. <https://www.iksr.org/>

IKSR (2015): Klimawandelanpassungsstrategie der IFGE Rhein. IKSR-Fachbericht Nr. 219. <https://www.iksr.org/>

IKSR (2016) (intern): Beschlussprotokoll Hochwasservorhersagenaustausches (HWVZ(1)16-02-01)

IKSR (2017/2018) (intern): Unterschiedliche Dokumente der AG H und EG LW, Bestandsaufnahme der nationalen Maßnahmen und Betroffenheiten, Literaturliste, etc.

IKSR (2017). Ecological aspects of low flow. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_4_gangi_ecology.pdf

Ionita Scholz, M. (2017) Monthly and seasonal predictions of Rhine low flows and water levels based on hydrologic, atmospheric and oceanic data. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_5_ionita-chr_basel.pdf

JRC (2017): European Drought Observatory – EDO. <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000>

KHR (1978): Das Rheingebiet – Hydrologische Monographie.

KHR (2017): Report/Summary of „Low flows in the Rhine catchment“ September 20-21, 2017 in Basel, Switzerland - Theme of the international-scientific symposium 'Science meets practice'. <http://www.chr-khr.org/en/event/low-flows-rhine-catchment> and http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/report_symposium_basel.pdf (summary)

Kohn, I. (2017): European Drought Impact Inventory (EDII) (EU Database). Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_6_edii_ikohn_chr.pdf und <http://www.eu-drought.org/>

LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement - Material – Stand 5. Februar 2007

MVW (Ministerie van Verkeer en Waterstaat) (2009a): Waterwet. Niederlande, 29. Januar 2009. <http://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/2018-01-01>

MVW (Ministerie van Verkeer en Waterstaat) (2009b): Waterbesluit. Niederlande, 30. November 2009. <http://wetten.overheid.nl/BWBR0026872/2017-01-01>

Puygrenier, D. und Antheaume, M. (2017): Impacts of low flows on the (water) energy sector. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_7_edf_chr_20170921_v3.pdf

Regierung von Unterfranken (2012): „Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie“ (AMÖ).
https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/6/3/2012_12_04_alarmplan_main.pdf

Stahl, K., Weiler, M., Kohn, I., Freudiger, D., Seibert, J., Vis, K., Gerlinger, K. und M. Böhm (2016): Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels – Synthesebericht. KHR-Bericht I-25 (Projektleitung J. Belz), ISBN 978-90-70980-37-5.

StMUV (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit) (2011):
Wasserbericht Bayern

UN (2013): Capacity Development to support national drought management policies.
<http://www.droughtmanagement.info/idmp-activities/capacity-development-to-support-national-drought-management-policies/>

UN-ECE (2017): „International Workshop on Water Scarcity: Taking action in transboundary basins and reducing health impacts“.
<https://www.unece.org/index.php?id=43633> und
<https://www.unece.org/info/media/news/environment/2018/water-scarcity-taking-action-in-transboundary-basins-and-addressing-health-impacts/doc.html>

Wahliß, W. (2017): Instruments for low flow management in Bavaria based on LAWA-guidance. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_3_2_Wahliß_lfm_in_bavaria.pdf

Weingartner, R. (2017): Low water in Switzerland. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_4_weingartner_low_flow_basel_wg_final.pdf

WMO (2009): Manual on Low-flow Estimation and Prediction - Operational Hydrology Report No. 50. WMO-No. 1029. http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/low-flow_estimation_prediction/WMO%201029%20en.pdf

WMO and GWP (2014): Integrated Drought Management Programme (IDMP).
<http://www.wmo.int/gfcs/idmp> und <http://www.droughtmanagement.info/find/library/>

Zappa, M. et al. (2017): Some current challenges in setting up and operating sub-seasonal to seasonal predictions of low flows in Switzerland. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_2_zappa_khr_2017_basel_wsl.pdf

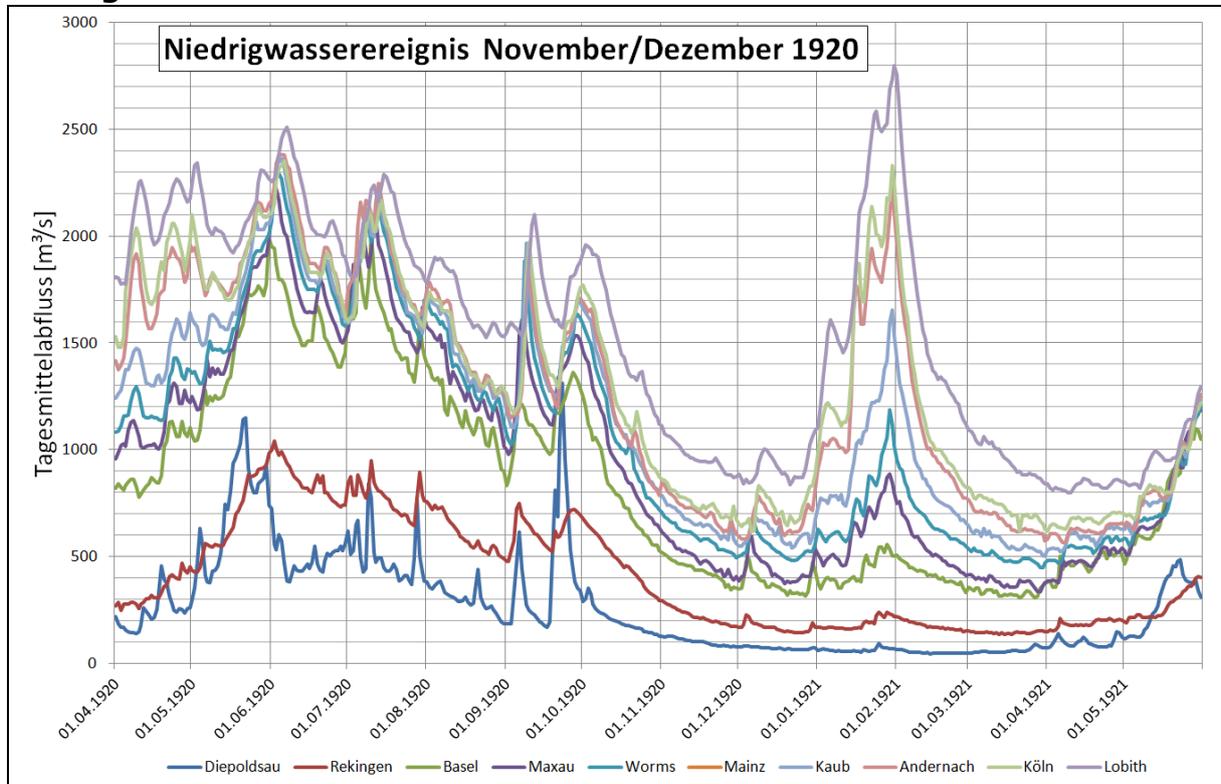
Anlagen

Anlage 2: Beschreibungen der ausgewählten Niedrigwasserereignisse

Anmerkung: Neben dem Ereignis 2003 das im Kapitel 7.5 besonders beschrieben worden ist, liegen der IKSR detaillierte Informationen zu meteorologischen und hydrologischen Entwicklungen sowie zur Auswirkung jeweiliger Ereignisse aus der Schweiz, vor.

Niedrigwasserereignis: November/Dezember 1920

1 Ganglinien:



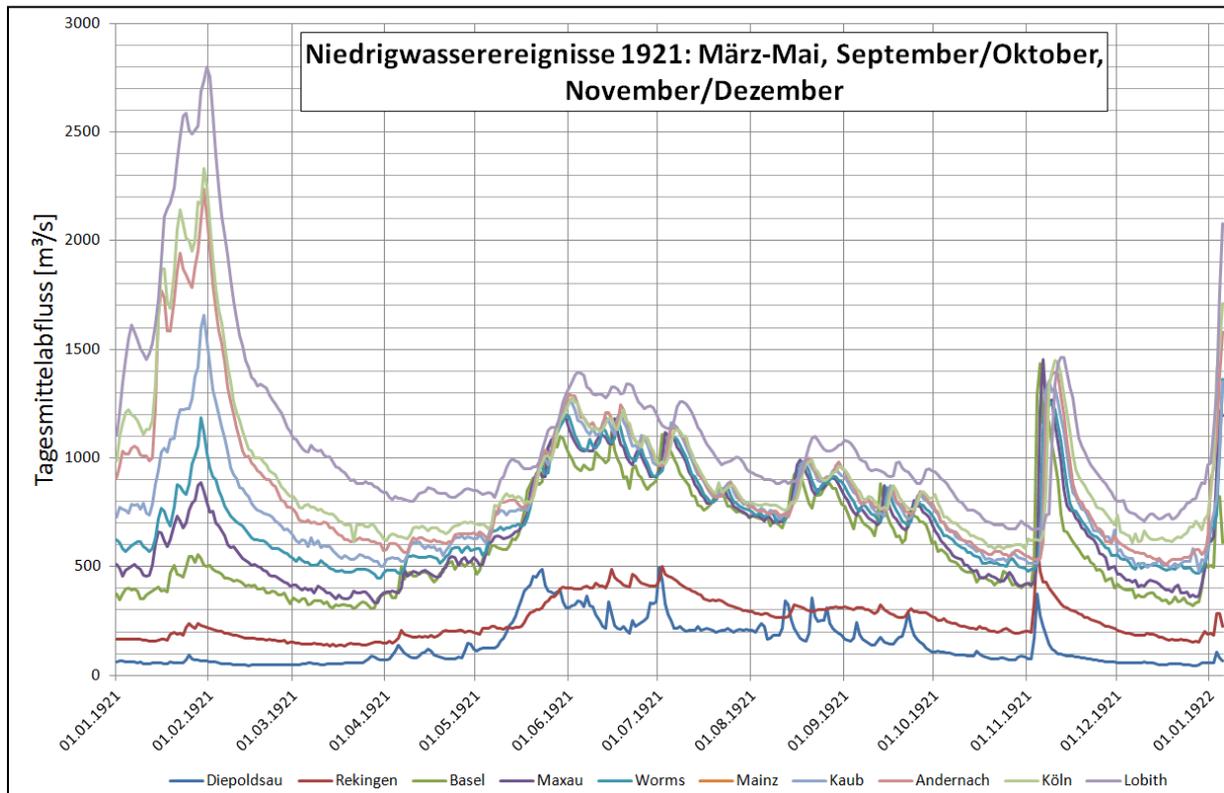
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Nov/Dez 1920	Jährlichkeit Nov/Dez 1920	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Nov/Dez 1920	Jährlichkeit Nov/Dez 1920
Diepoldsau	92,2	64	15 - 20	4	42	> 50
Rekingen	238	145	50	7	75	> 50
Basel	527	326	100	5	85	> 50
Maxau	645	382	50	5	76	> 50
Worms	720	489	20	5	75	> 50
Mainz	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	559	20	6	79	50
Andernach	998	596	50	6	72	50
Köln	1028	645	50	6	69	40
Lobith	1095	858	15	6	60	15

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignisse 1921: März-Mai, Sep/Okt und Nov/Dez

1 Ganglinien:



2 Kennwerte:

Ereignis März – Mai 1921

	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Mrz - Mai 1921	Jährlichkeit Mrz - Mai 1921	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Mrz - Mai 1921	Jährlichkeit Mrz - Mai 1921
Diepoldsau	92,2	49	100	4	67	> 50
Rekingen	238	138	100	7	108	> 50
Basel	527	318	100	5	95	> 100
Maxau	645	359	60	5	96	> 100
Worms	720	468	30	5	99	> 50
Mainz	850	-		6	-	
Kaub	851	523	50	6	96	> 50
Andernach	998	589	50	6	97	> 100
Köln	1028	637	50	6	100	> 100
Lobith	1095	809	15	6	85	> 50

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf die Referenzperiode 1961 - 2010

Ereignis September/Oktober 1921

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sep/Okt 1921	Jährlichkeit Sep/Okt 1921	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Sep/Okt 1921	Jährlichkeit Sep/Okt 1921
Diepoldsau	92,2	75	5	4	17	20
Rekingen	238	199	5	7	25	2-5
Basel	527	414	5-10	5	27	5-10
Maxau	645	420	20	5	33	10
Worms	720	494	20	5	36	10
Mainz	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	523	50	6	51	20
Andernach	998	544	100	6	78 *	50 *
Köln	1028	590	100	6	119	> 100
Lobith	1095	682	75	6	79 *	> 50 *

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf die Referenzperiode 1961 - 2010

*Niedrigwasserperiode durch einen Tag mit Q > Schwellenwert unterbrochen, ansonsten wäre es
 Jährlichkeit > 100

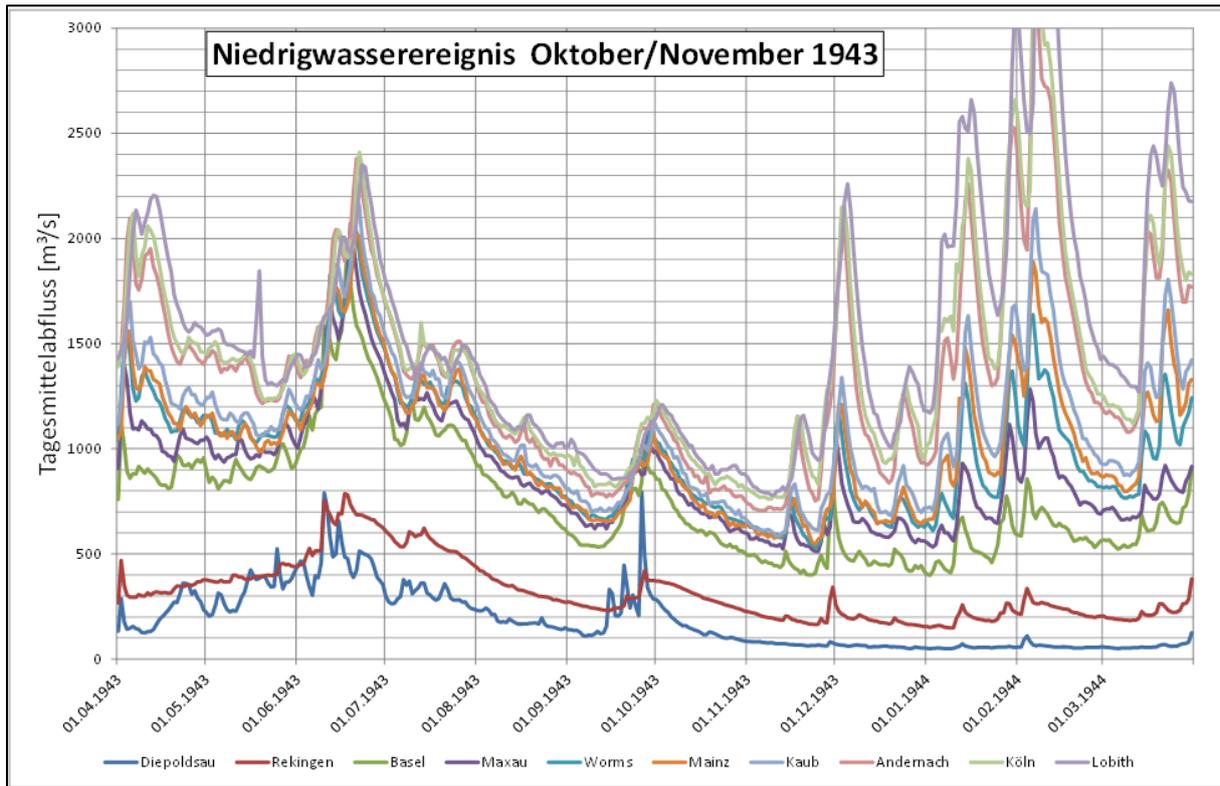
Ereignis November/Dezember 1921

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Nov/Dez 1921	Jährlichkeit Nov/Dez 1921	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Nov/Dez 1921	Jährlichkeit Nov/Dez 1921
Diepoldsau	92,2	48	100	4	50	> 100
Rekingen	238	157	20	7	38	5-10
Basel	527	336	50	5	42	15
Maxau	645	371	50	5	43	15
Worms	720	483	50	5	45	15
Mainz	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	509	70	6	48	15
Andernach	998	527	> 100	6	49	15
Köln	1028	623	60	6	49	15
Lobith	1095	729	30	6	45	10

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf die Referenzperiode 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Oktober/ November 1943

1 Ganglinien:



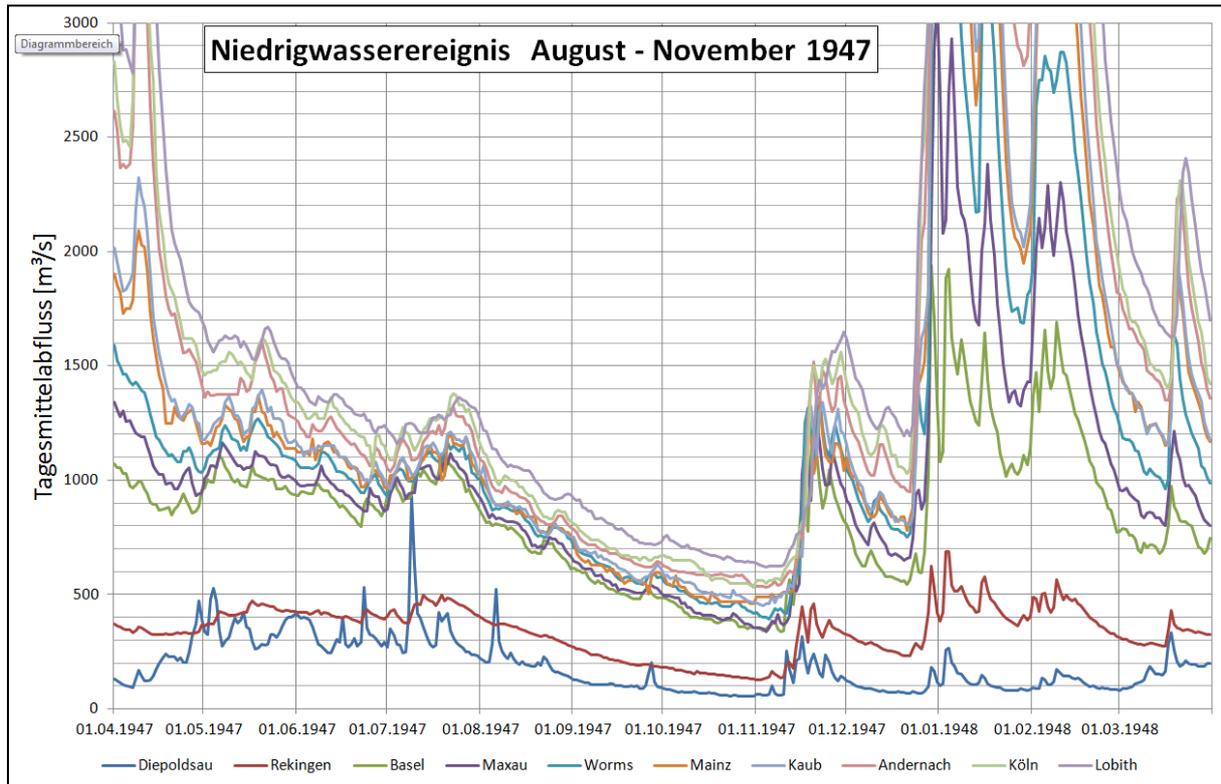
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961-2010	NM7Q Okt/Nov 1943	Jährlichkeit Okt/Nov 1943	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < NM7Q Okt/Nov 1943	Jährlichkeit Okt/Nov 1943
Diepoldsau	92,2	64	20	4	32	>100
Rekingen	238	170	15	7	29	5
Basel	527	410	15	5	38	10
Maxau	645	530	5	5	21	5
Worms	720	556	5-10	5	23	5
Mainz	850	586	20	6	52	20
Kaub	851	601	20	6	49	20
Andernach	998	712	15	6	39	10
Köln	1028	769	10	6	37	10
Lobith	1095	791	15	6	41	5-10

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: August - November 1947

1 Ganglinien:



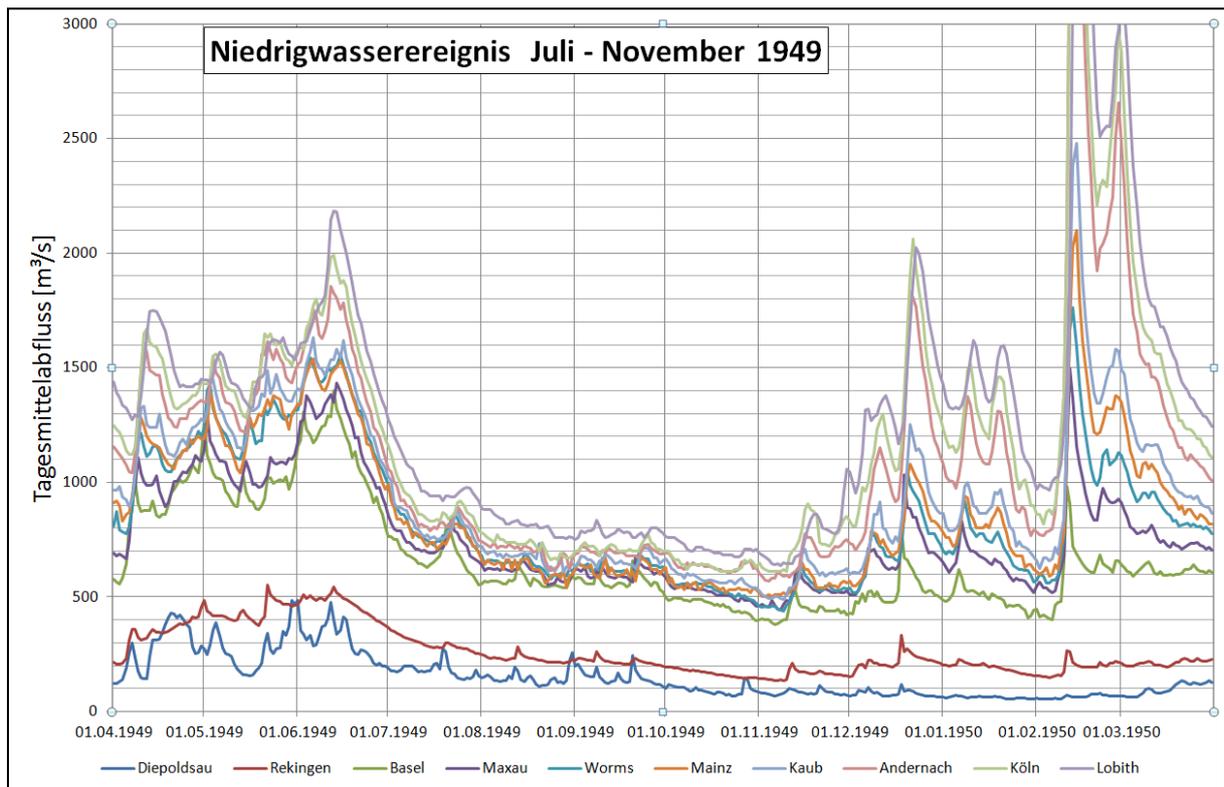
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q 1947	Jährlichkeit 1947	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q 1947	Jährlichkeit 1947
Diepoldsau	92,2	55	50	4	41	>100
Rekingen	238	131	100	7	68	20
Basel	527	351	40	5	60	55
Maxau	645	353	70	5	75	70
Worms	720	407	70	5	75	>50
Mainz	850	467	>100	6	93	>50
Kaub	851	460	>100	6	92	>>50
Andernach	998	536	>100	6	105	>100
Köln	1028	546	>100	6	104	>100
Lobith	1095	624	>100	6	104	>>50

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Juli - November 1949

1 Ganglinien:



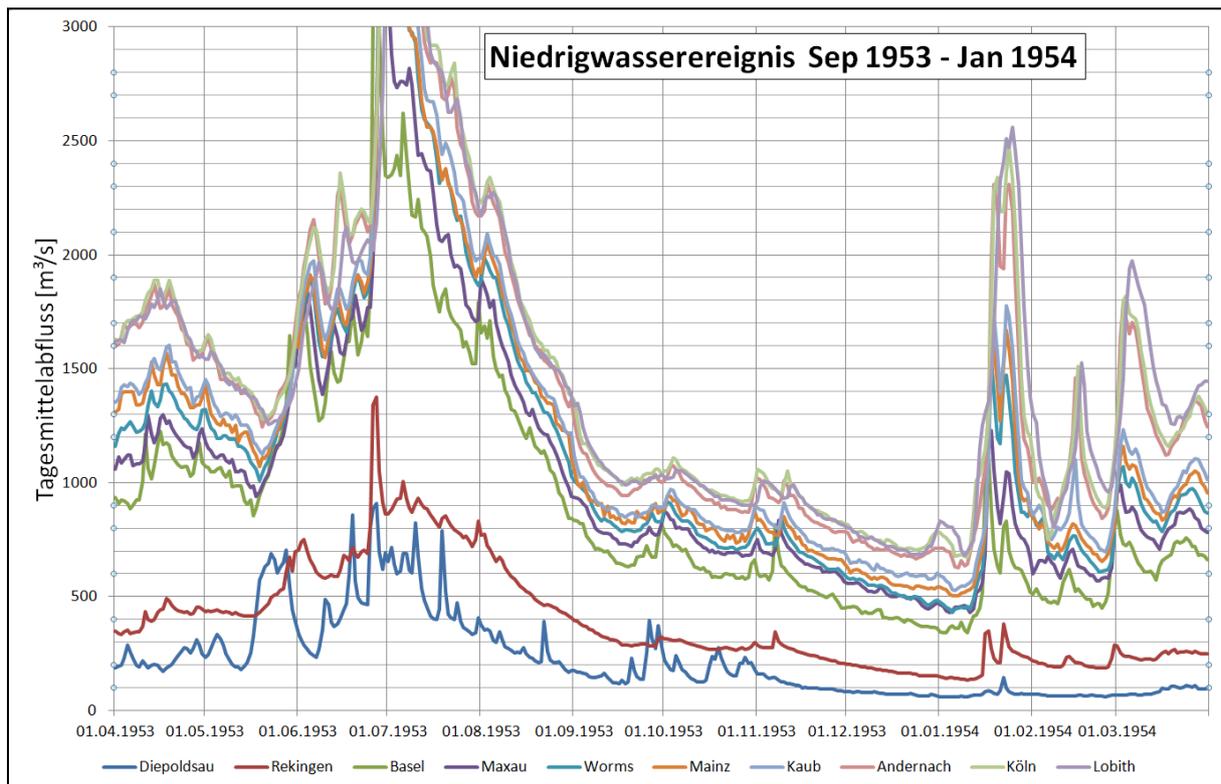
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m^3/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7 Q 1961- 2010	NM7Q Jul -Nov 1949	Jährlichkeit Jul-Nov 1949	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Jul-Nov 1949	Jährlichei t Jul-Nov 1949
Diepoldsau	92,2	72	5-10	4	14	10
Rekingen	238	138	100	7	99	>50
Basel	527	392	10	5	44	20
Maxau	645	460	10	5	75	>50
Worms	720	452	35	5	131	>>50
Mainz	850	506	75	6	169	>>50
Kaub	851	497	>100	6	137	>>50
Andernach	998	587	>100	6	158	>100
Köln	1028	611	70	6	156	>100
Lobith	1095	644	>100	6	151	>>50

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: September 1953 bis Januar 1954

1 Ganglinien:



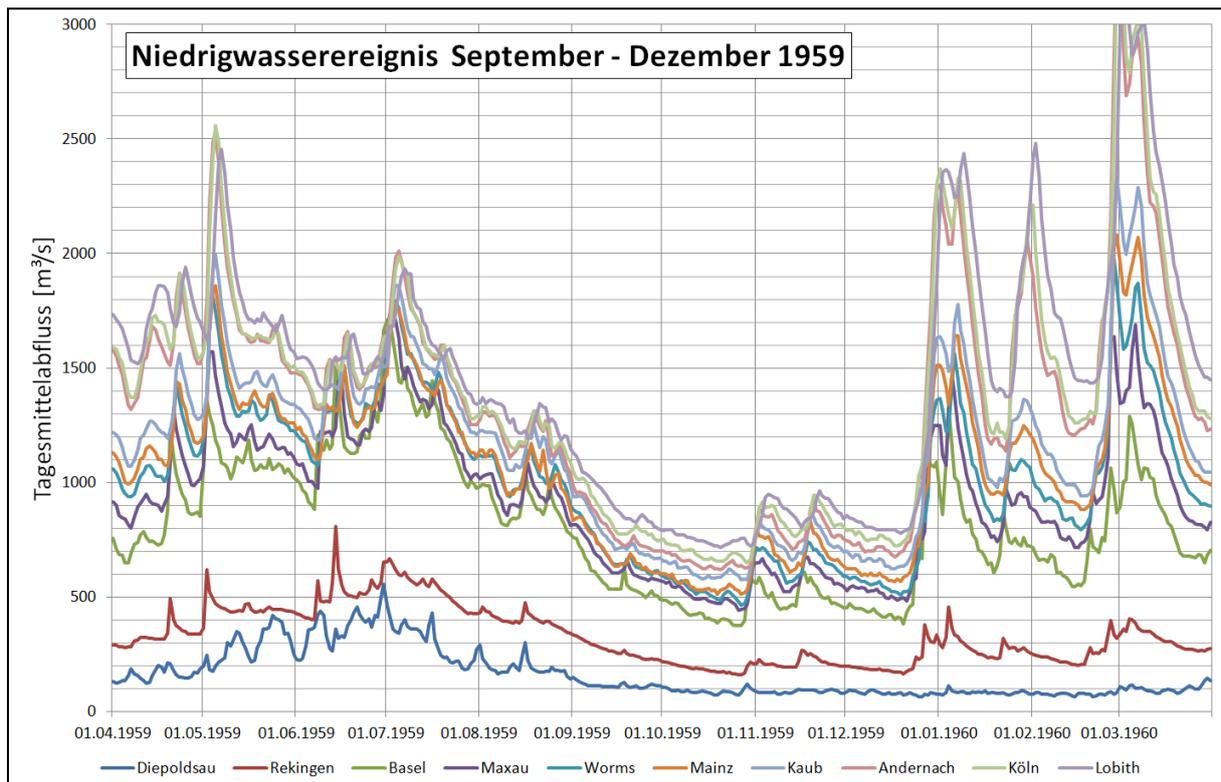
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sep 1953 - Jan 1954	Jährlichkeit Sep 1953 - Jan 1954	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Sep 1953 - Jan 1954	Jährlichkeit Sep 1953 - Jan 1954
Diepoldsau	92,2	60	25	4	50	>100
Rekingen	238	137	100	7	56	10-20
Basel	527	354	35	5	59	>50
Maxau	645	446	15	5	60	50
Worms	720	447	40	5	63	40
Mainz	850	511	70	6	67	35
Kaub	851	542	40	6	66	35
Andernach	998	650	30	6	66	40
Köln	1028	689	30	6	63	40
Lobith	1095	690	60	6	126	>>50

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: September – Dezember 1959

1 Ganglinien:



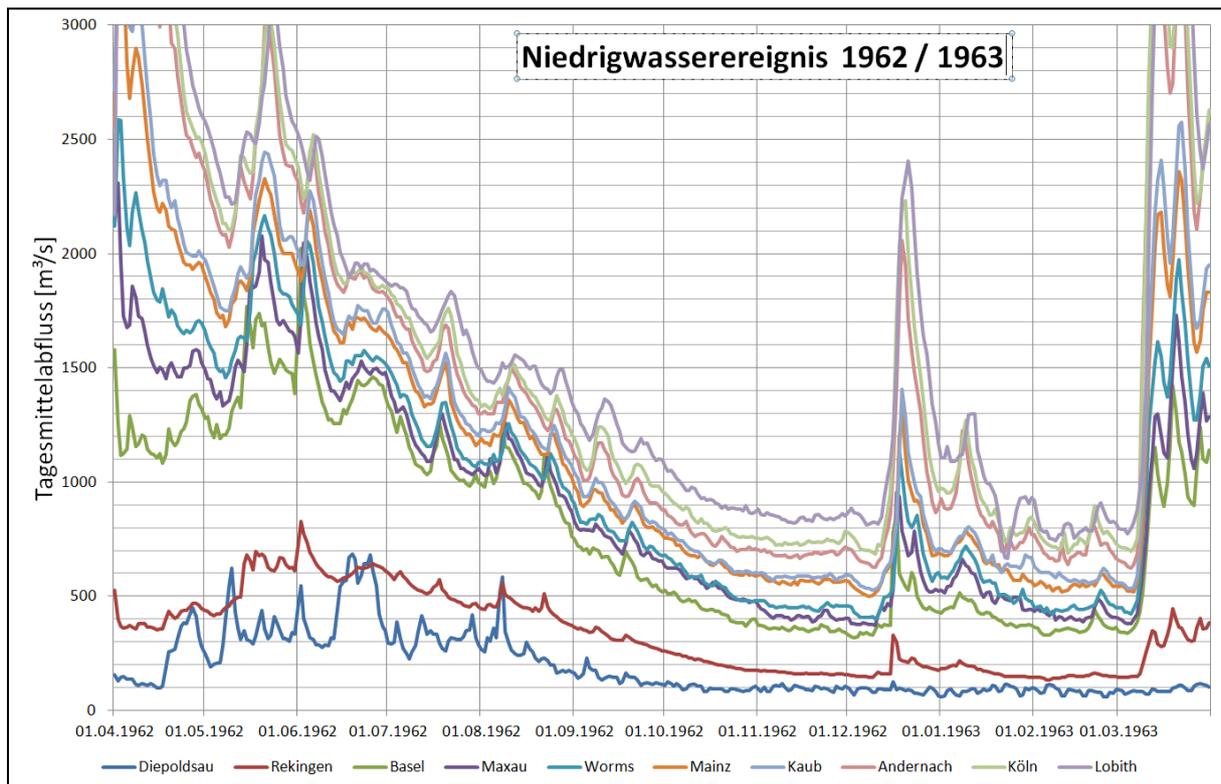
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sep - Dez 1959	Jährlichkeit Sep - Dez 1959	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Sep - Dez 1959	Jährlichkeit Sep - Dez 1959
Diepoldsau	92,2	72	10	4	43	>100
Rekingen	238	165	20	7	54	10-20
Basel	527	386	20	5	32	5-10
Maxau	645	462	15	5	42	15
Worms	720	492	20	5	68	50
Mainz	850	529	55	6	113	>>50
Kaub	851	586	20	6	72	50
Andernach	998	625	40	6	115	>100
Köln	1028	661	35	6	114	>100
Lobith	1095	726	35	6	115	>>50

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Oktober – Dezember 1962

1 Ganglinien:



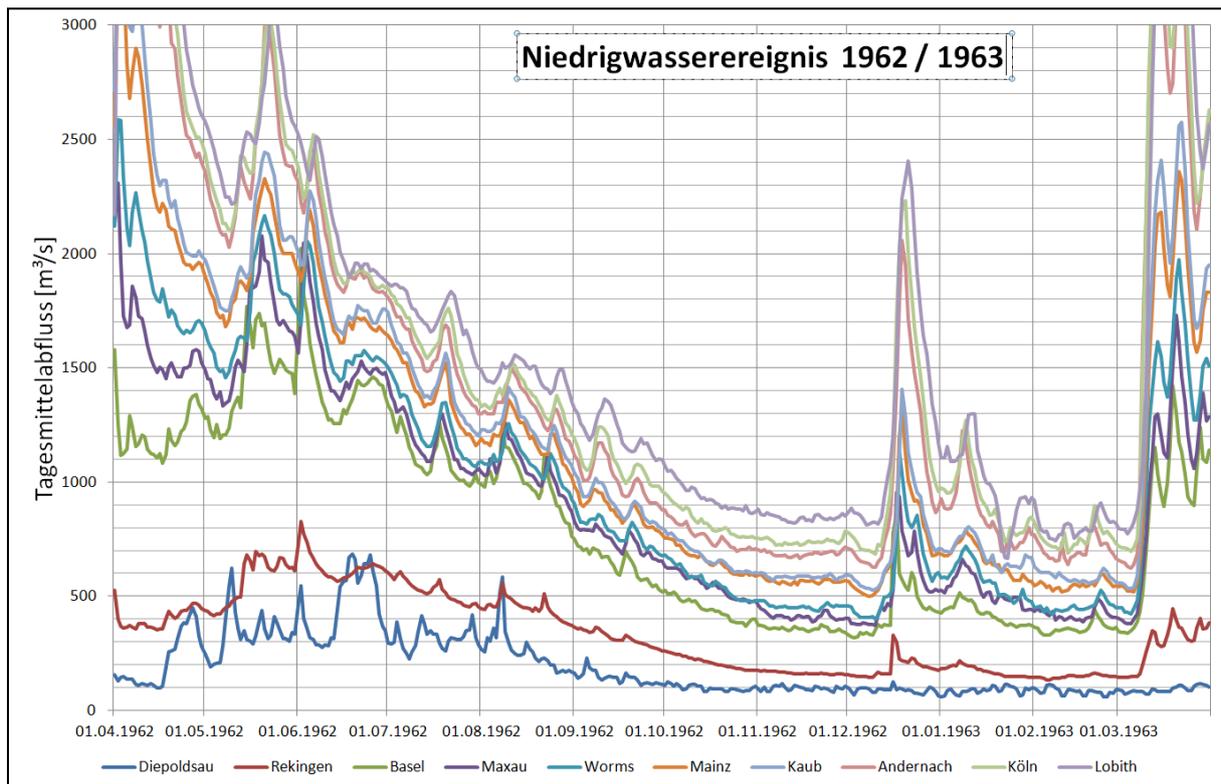
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m^3/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Okt - Dez 1962	Jährlichkeit Okt - Dez 1962	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Okt - Dez 1962	Jährlichkeit Okt - Dez 1962
Diepoldsau	92,2	88	2-5	4	8	2-5
Rekingen	238	148	50	7	82	50
Basel	527	330	65	5	77	75
Maxau	645	378	50	5	77	75
Worms	720	408	70	5	84	>50
Mainz	850	512	70	6	85	>50
Kaub	851	535	50	6	85	>50
Andernach	998	642	30	6	84	50
Köln	1028	702	20	6	82	40
Lobith	1095	824	10-15	6	76	40

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Januar - März 1963

1 Ganglinien:



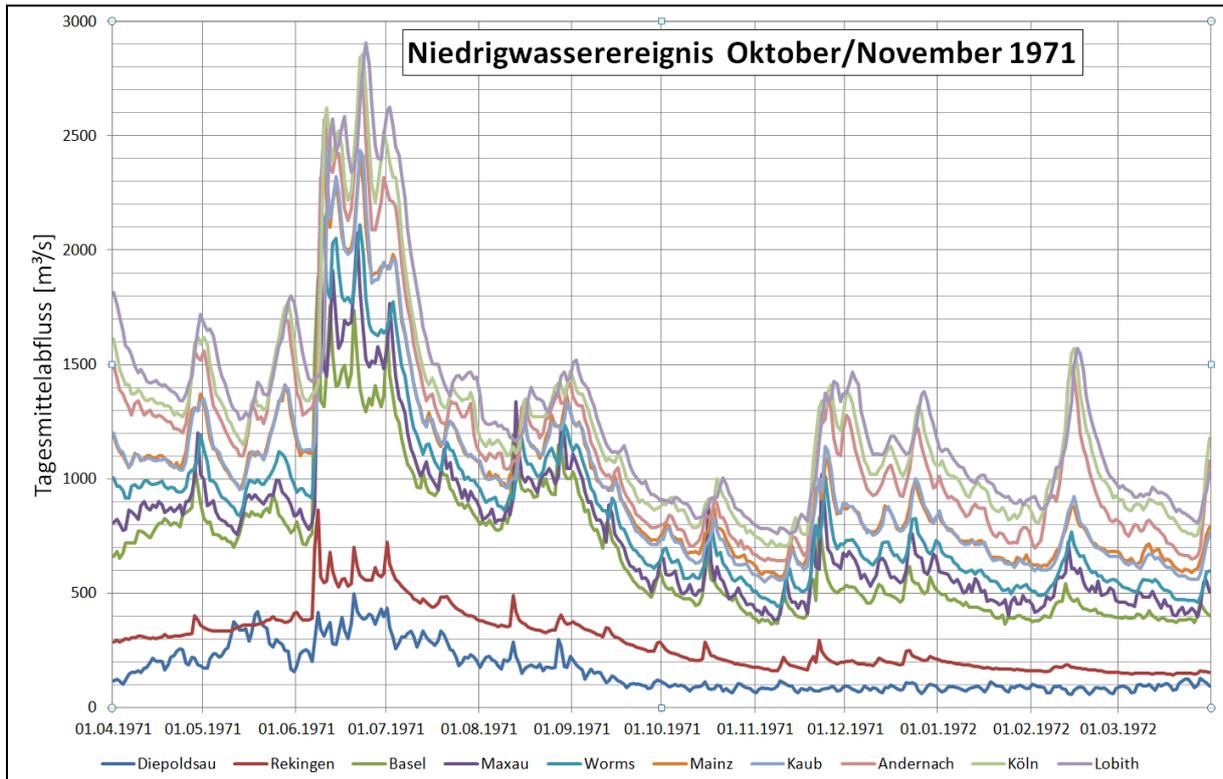
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Jan - Mrz 1963	Jährlichkeit Jan - Mrz 1963	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Jan - Mrz 1963	Jährlichkeit Jan - Mrz 1963
Diepoldsau	92,2	73	5-10	4	38	>100
Rekingen	238	139	65	7	68	20
Basel	527	338	55	5	68	>50
Maxau	645	394	35	5	60	50
Worms	720	434	50	5	73	>50
Mainz	850	530	50	6	74	40
Kaub	851	547	40	6	72	50
Andernach	998	645	30	6	56	30
Köln	1028	712	20	6	55	20
Lobith	1095	765	20	6	55	15

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Oktober/November 1971

1 Ganglinien:



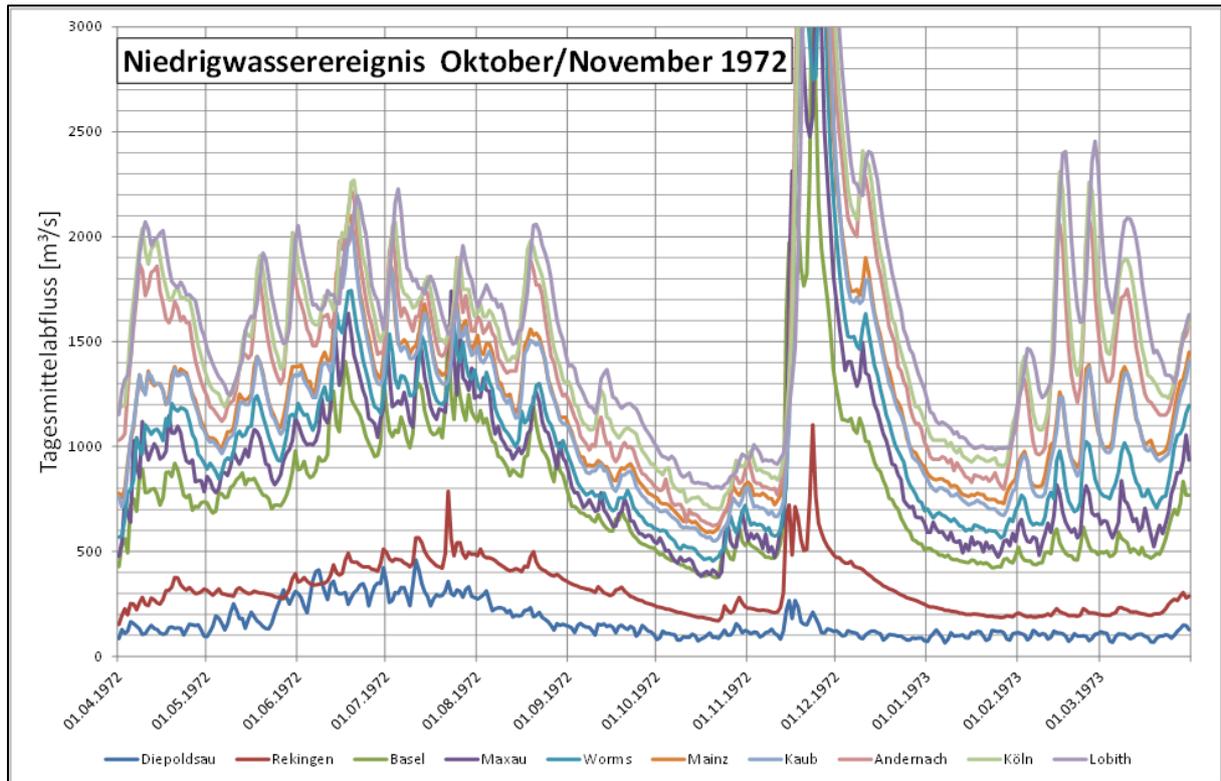
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Okt/Nov 1971	Jährlichkeit Okt/Nov 1971	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Okt/Nov 1971	Jährlichkeit Okt/Nov 1971
Diepoldsau	92,2	77	5	4	17	20
Rekingen	238	166	20	7	57	10-20
Basel	527	374	20	5	33	10
Maxau	645	404	30	5	52	30
Worms	720	462	30	5	34	10
Mainz	850	585	25	6	33	5-10
Kaub	851	562	35	6	62	30
Andernach	998	643	30	6	64	35
Köln	1028	713	20	6	62	35
Lobith	1095	771	20	6	63	15

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Oktober/November 1972

1 Ganglinien:



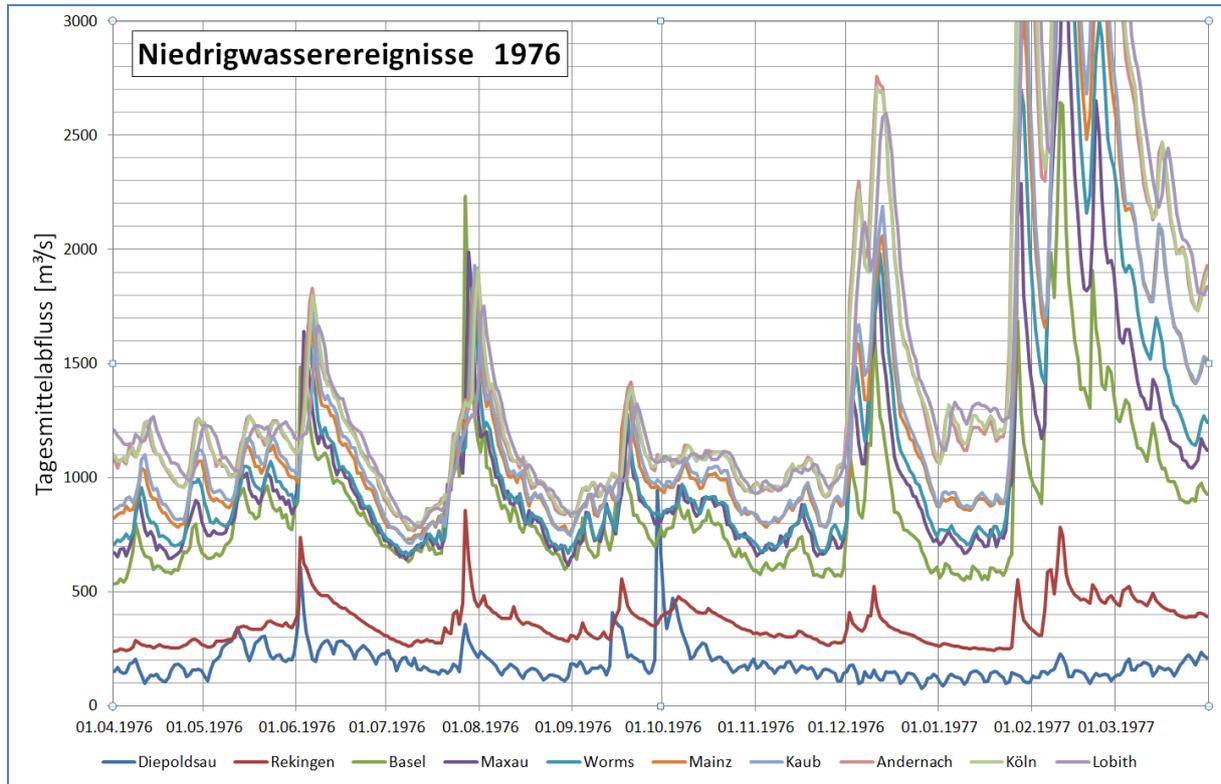
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Okt/Nov 1972	Jährlichkeit Okt/Nov 1972	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Okt/Nov 1972	Jährlichkeit Okt/Nov 1972
Diepoldsau	92,2	90	2	4	3	2
Rekingen	238	178	10	7	27	5
Basel	527	384	10	5	44	15
Maxau	645	395	35	5	37	15
Worms	720	467	30	5	38	15
Mainz	850	585	25	6	50	15
Kaub	851	565	30	6	51	15
Andernach	998	634	35	6	52	20
Köln	1028	712	20	6	50	20
Lobith	1095	810	15	6	49	10

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignisse: Juli 1976, August/September 1976 und Oktober/November 1976

1 Ganglinien:



2 Kennwerte:

Ereignis: Juli 1976

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Juli 1976	Jährlichkeit Juli 1976	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Juli 1976	Jährlichkeit Juli 1976
Diepoldsau	92,2	149	<2	4	0	-
Rekingen	238	272	<2	7	0	-
Basel	527	656	<2	5	0	-
Maxau	645	665	<2	5	0	-
Worms	720	678	2-5	5	11	2-5
Mainz	850	739	2-5	6	22	5
Kaub	851	729	2-5	6	20	5
Andernach	998	782	5-10	6	23	5
Köln	1028	796	5-10	6	25	5
Lobith	1095	802	15	6	29	5

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Ereignis: August/September 1976

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Aug/Sep 1976	Jährlichkeit Aug/Sep 1976	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Aug/Sep 1976	Jährlichkeit Aug/Sep 1976
Diepoldsau	92,2	125	<2	4	0	-
Rekingen	238	295	<2	7	0	-
Basel	527	638	<2	5	0	-
Maxau	645	663	<2	5	2	<2
Worms	720	694	<2	5	8	2-5
Mainz	850	778	2-5	6	10	2-5
Kaub	851	770	2-5	6	10	2-5
Andernach	998	843	2-5	6	27	5
Köln	1028	851	2-5	6	32	5-10
Lobith	1095	853	5-10	6	38	5-10

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

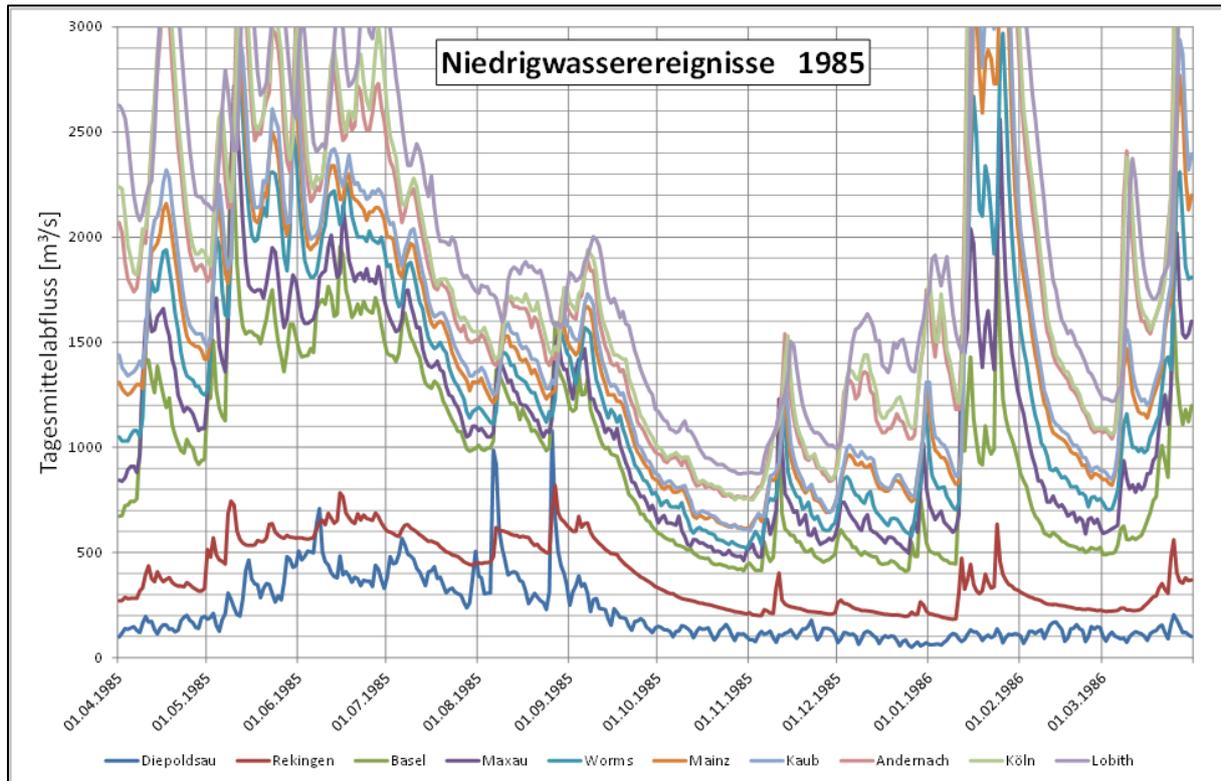
Ereignis: Oktober/November 1976

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Okt/Nov 1976	Jährlichkeit Okt/Nov 1976	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Okt/Nov 1976	Jährlichkeit Okt/Nov 1976
Diepoldsau	92,2	137	<2	4	0	-
Rekingen	238	274	<2	7	0	-
Basel	527	581	<2	5	0	-
Maxau	645	681	<2	5	0	-
Worms	720	694	2-5	5	9	2-5
Mainz	850	802	2-5	6	15	2-5
Kaub	851	809	2-5	6	15	2-5
Andernach	998	949	2-5	6	16	2-5
Köln	1028	955	2-5	6	18	2-5
Lobith	1095	955	2-5	6	38	5-10

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Oktober/November 1985

1 Ganglinien:



2 Kennwerte:

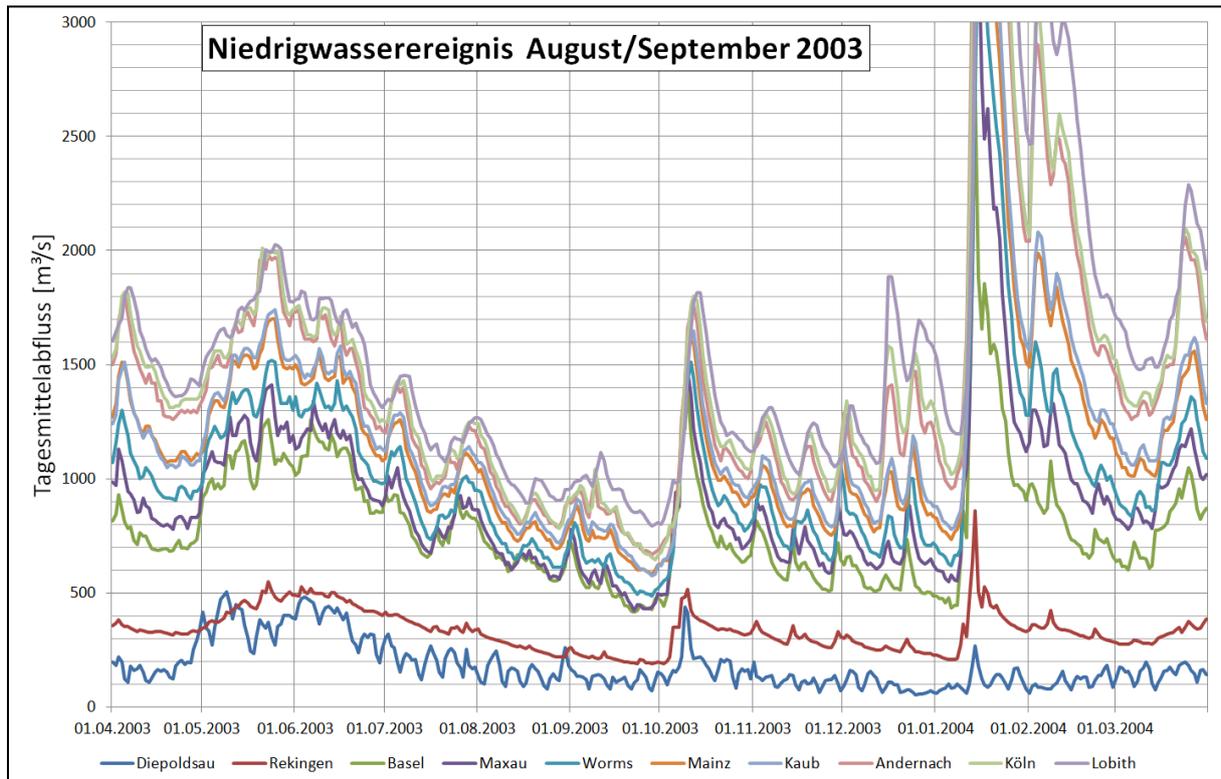
	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Okt/Nov 1985	Jährlichkeit Okt/Nov 1985	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Okt/Nov 1985	Jährlichkeit Okt/Nov 1985
Diepoldsau	92,2	96	<2	4	3	2
Rekingen	238	206	5	7	19	2-5
Basel	527	425	5	5	27	5-10
Maxau	645	486	10	5	29	5-10
Worms	720	534	10	5	28	5-10
Mainz	850	620	15	6	39	10
Kaub	851	616	15	6	37	10
Andernach	998	763	10	6	39	10
Köln	1028	756	10	6	40	10
Lobith	1095	877	5-10	6	31	5-10

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: August/September 2003

(siehe Kap. 7.5 für eine detaillierte Beschreibung des Ereignisses)

1 Ganglinien:



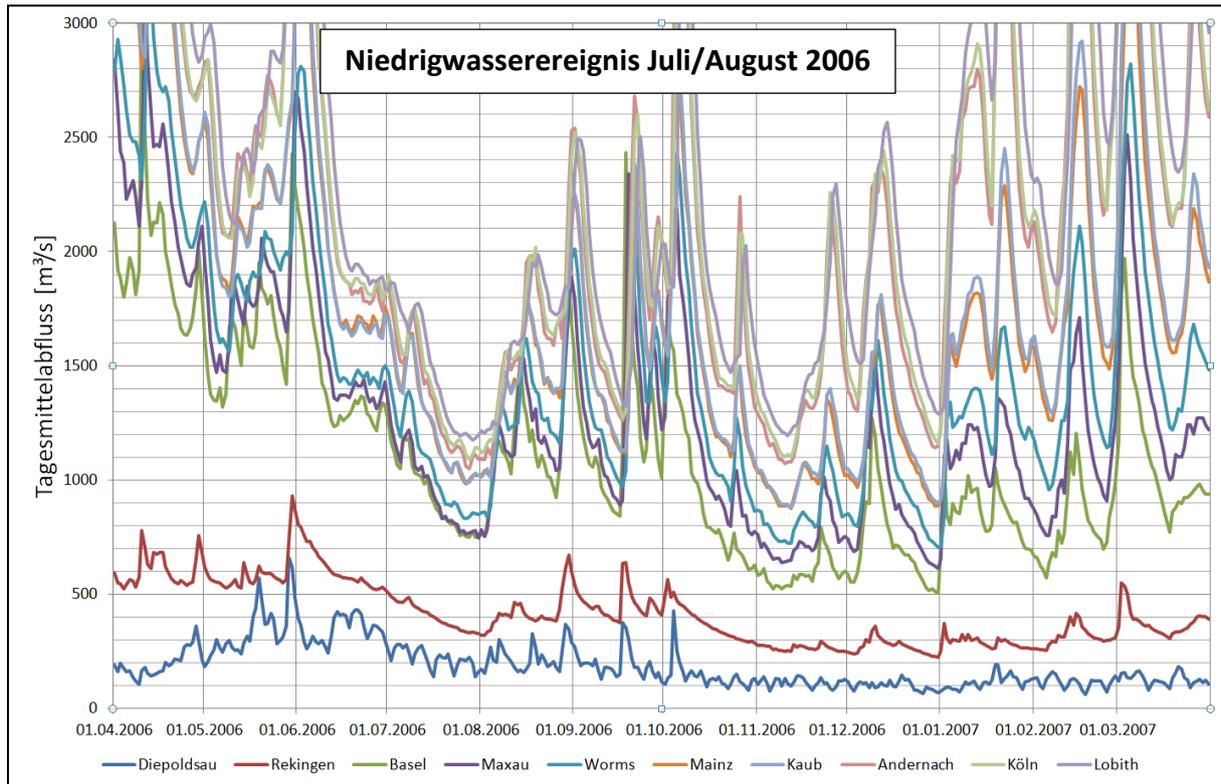
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sep 2003	Jährlichkeit Sep 2003	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Sep 2003	Jährlichkeit Sep 2003
Diepoldsau	92,2	108	< 2	4	2	< 2
Rekingen	238	193	5	7	22	2-5
Basel	527	431	5	5	20	5
Maxau	645	435	20	5	31	5-10
Worms	720	500	15	5	31	5-10
Mainz	850	596	20	6	33	5-10
Kaub	851	595	20	6	32	5-10
Andernach	998	682	20	6	62	30
Köln	1028	666	35	6	33	5-10
Lobith	1095	808	15	6	34	5-10

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Juli/August 2006

1 Ganglinien:



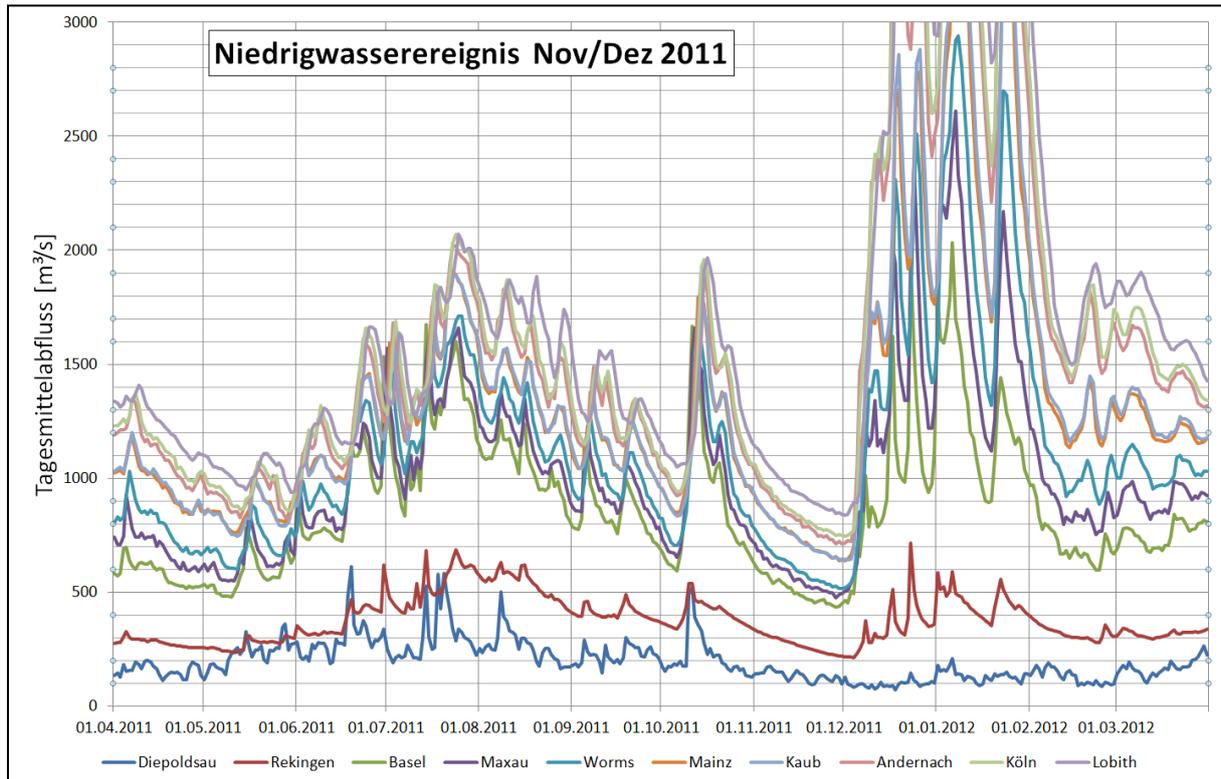
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m ³ /s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Jul-Aug 2006	Jährlichkeit Jul-Aug 2006	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Jul-Aug 2006	Jährlichkeit Jul-Aug 2006
Diepoldsau	92,2	178	<2	4	0	-
Rekingen	238	329	<2	7	0	-
Basel	527	756	<2	5	0	-
Maxau	645	766	<2	5	0	-
Worms	720	845	<2	5	0	-
Mainz	850	1008	<2	6	0	-
Kaub	851	1008	<2	6	0	-
Andernach	998	1084	<2	6	0	-
Köln	1028	1120	<2	6	0	-
Lobith	1095	1190	<2	6	0	-

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: November/Dezember 2011

1 Ganglinien:



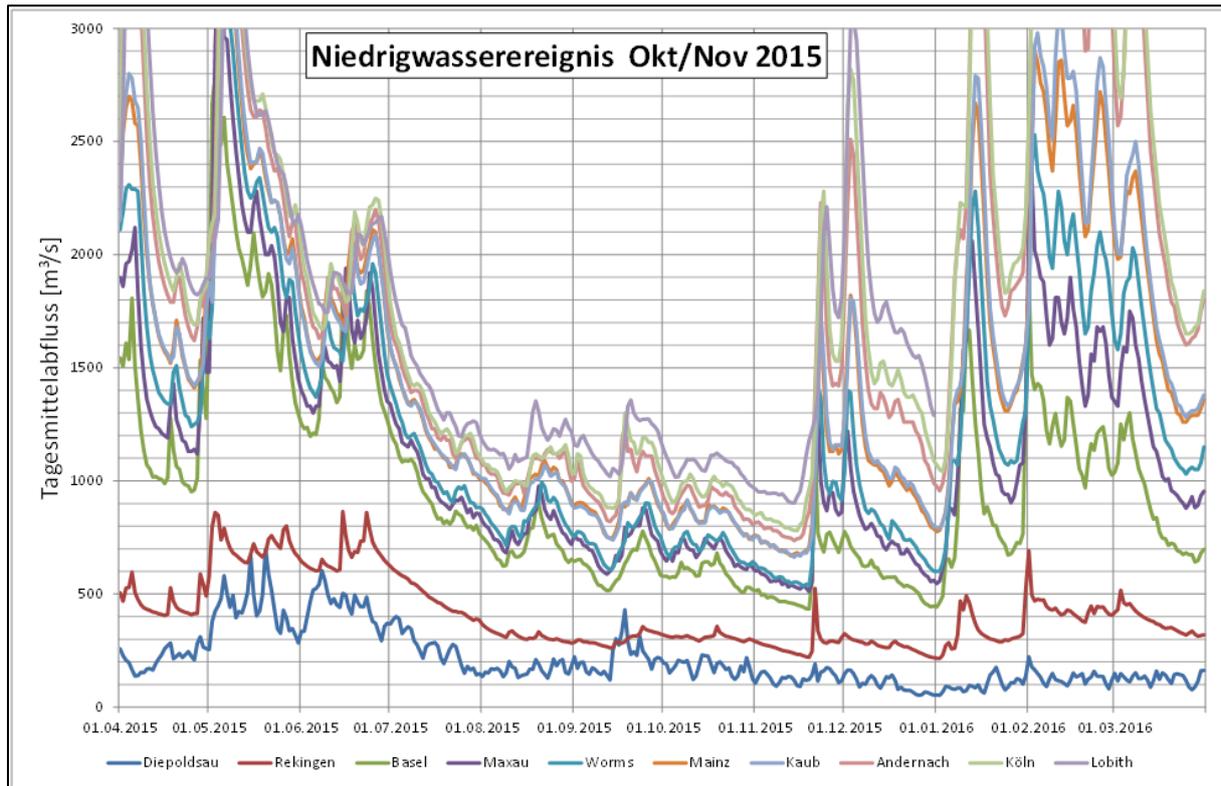
2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m³/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Nov/Dez 2011	Jährlichkeit Nov/Dez 2011	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Nov/Dez 2011	Jährlichkeit Nov/Dez 2011
Diepoldsau	92,2	92	2	4	2	<2
Rekingen	238	218	2	7	13	2-5
Basel	527	447	5	5	23	5
Maxau	645	495	5-10	5	30	5-10
Worms	720	523	10	5	32	5-10
Mainz	850	647	10	6	30	5-10
Kaub	851	645	10	6	30	5-10
Andernach	998	721	10	6	32	5-10
Köln	1028	751	10	6	33	5-10
Lobith	1095	848	10	6	33	5-10

MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Niedrigwasserereignis: Oktober/November 2015

1 Ganglinien:

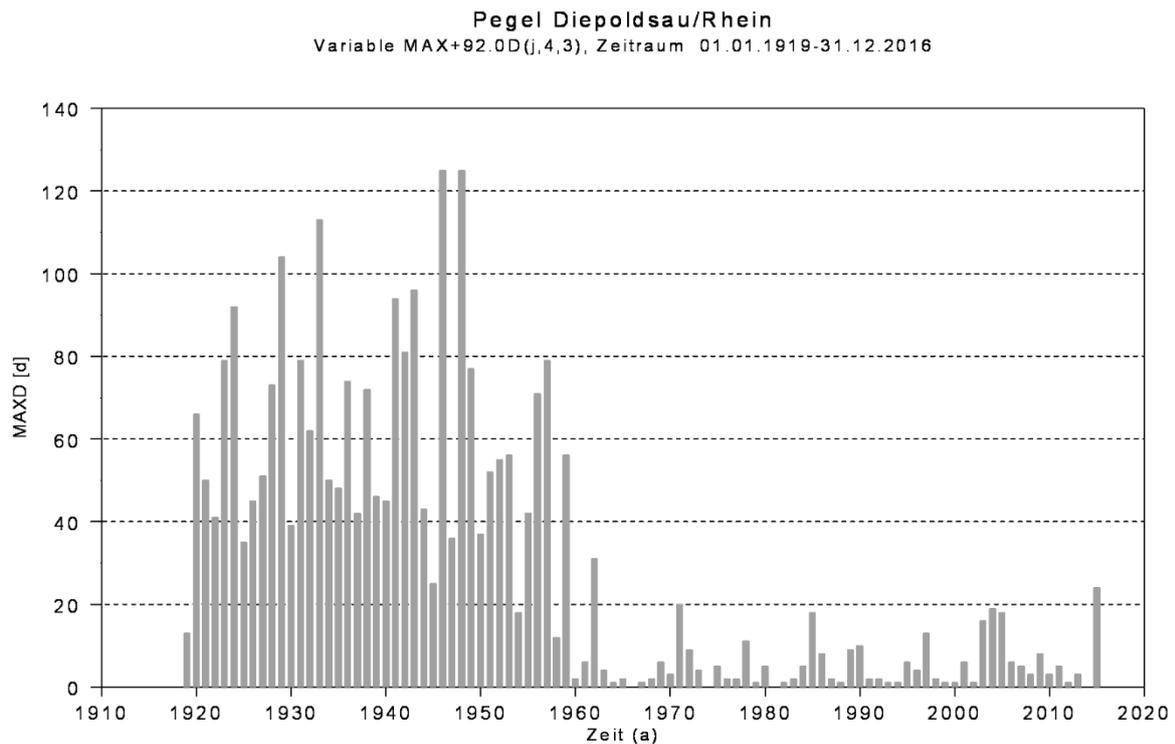


2 Kennwerte:

	Niedrigwasser-Abfluss [m^3/s]			Niedrigwasser-Dauer [Tage]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Okt/Nov 2015	Jährlichkeit Okt/Nov 2015	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Okt/Nov 2015	Jährlichkeit Okt/Nov 2015
Diepoldsau	92,2	115	<2	4	1	<2
Rekingen	238	231	2	7	5	<2
Basel	527	447	5	5	20	5-10
Maxau	645	528	5	5	27	5-10
Worms	720	545	10	5	29	5-10
Mainz	850	678	5-10	6	28	5-10
Kaub	851	675	5-10	6	28	5-10
Andernach	998	747	5-10	6	51	20
Köln	1028	792	5-10	6	41	15
Lobith	1095	922	5-10	6	27	5

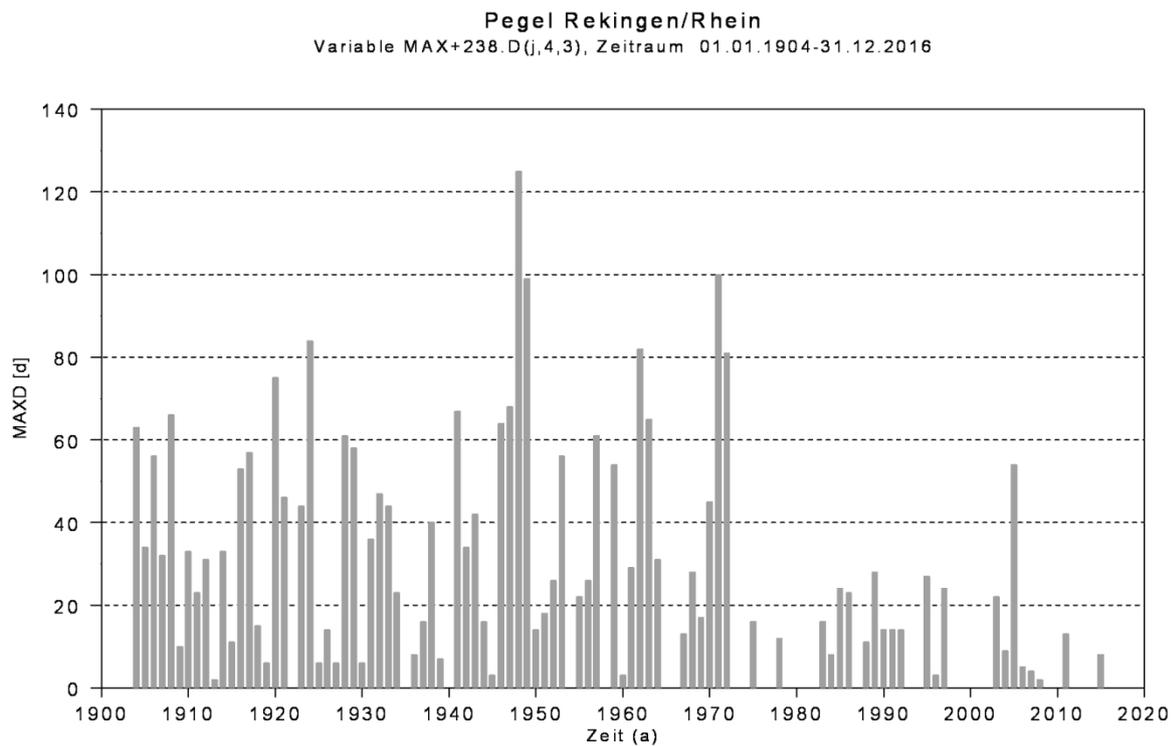
MaxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen < MNM7Q
 NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q
 Jährlichkeitsangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 - 2010

Anlage 3: Darstellungen der Niedrigwasserdauern (MaxD)



HyStat HQ/NQ 3.0

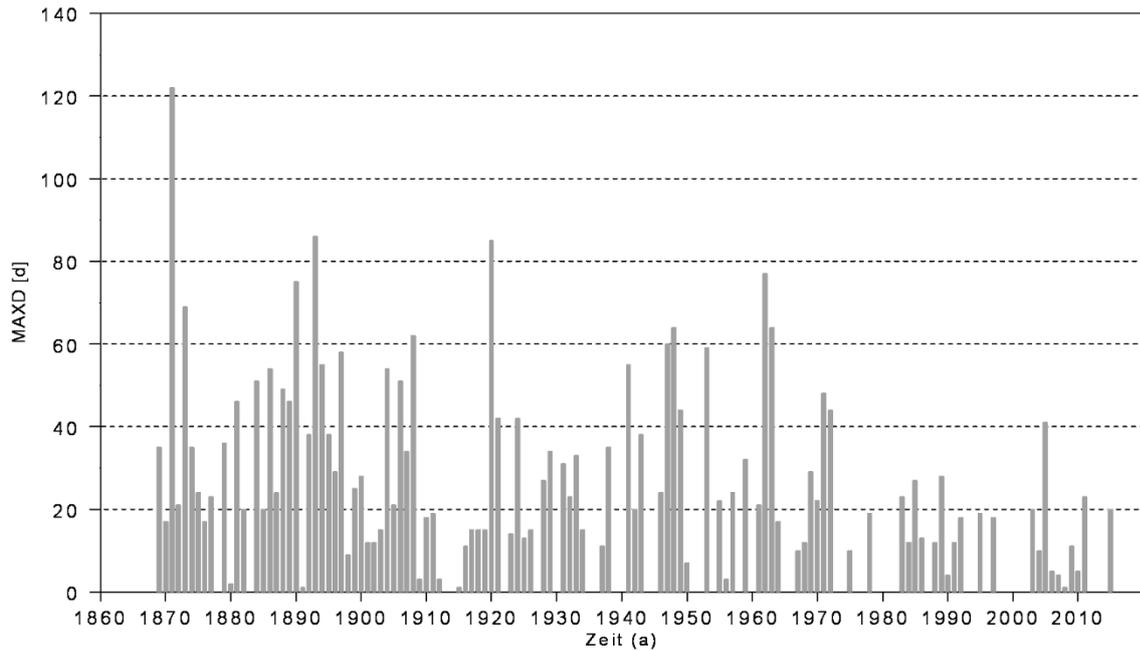
HLNUG 2017



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

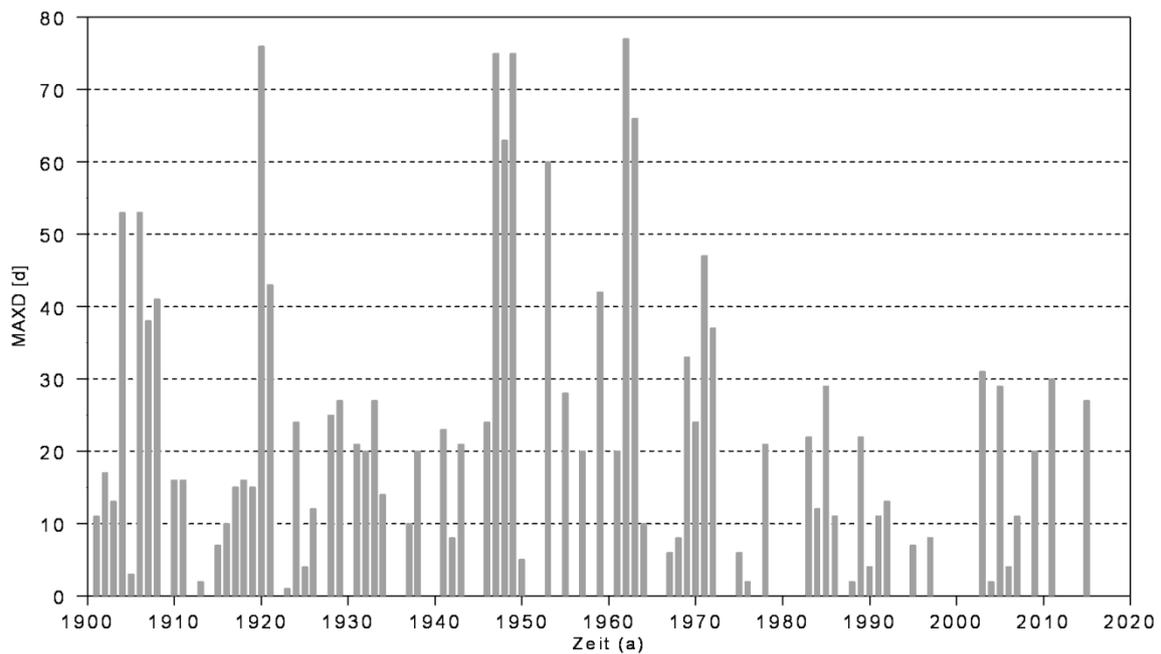
Pegel Basel/Rhein
Variable MAX+527.D(j,4,3), Zeitraum 01.01.1869-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

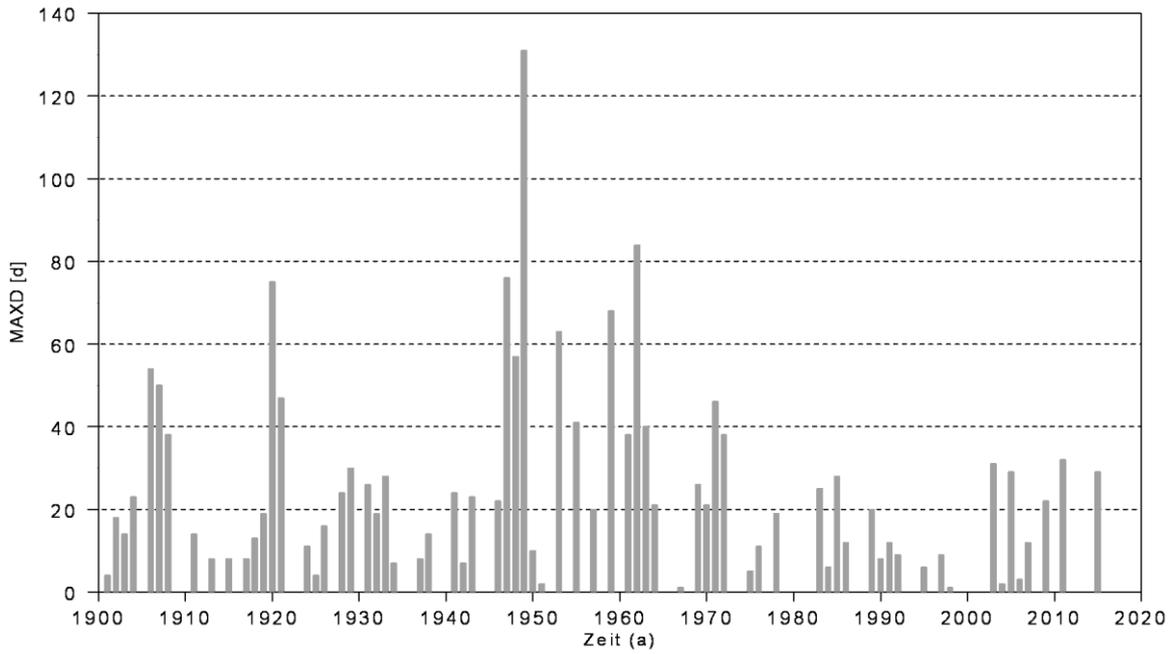
Pegel Maxau/Rhein
Variable MAX+645.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

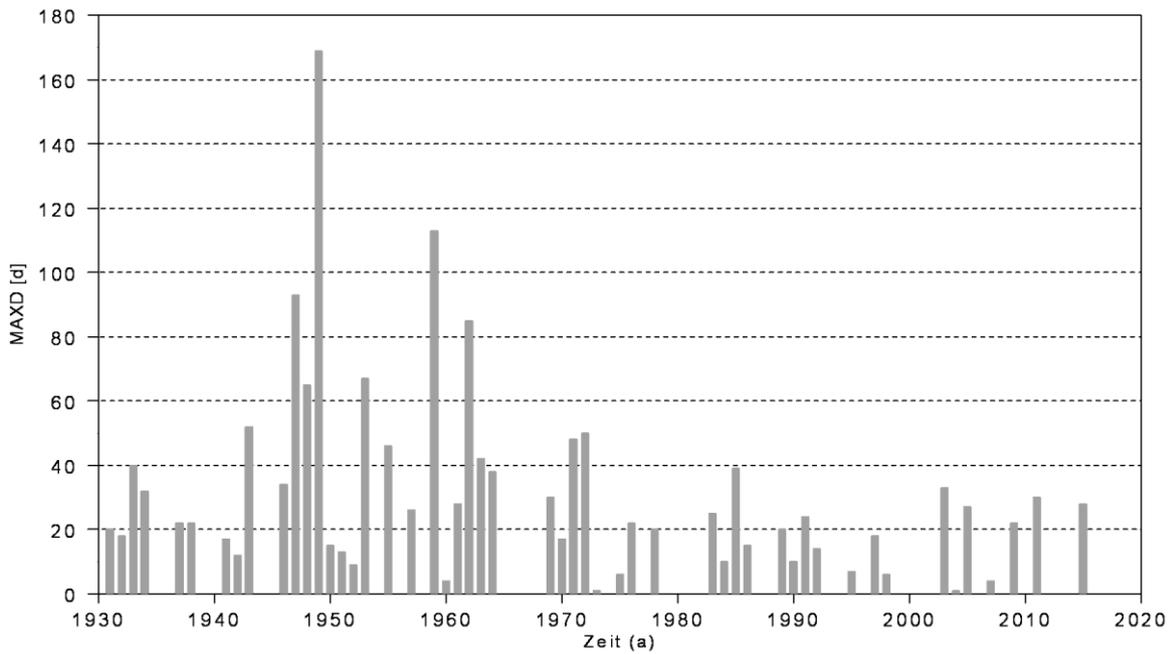
Pegel Worms/Rhein
 Variable MAX+720.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

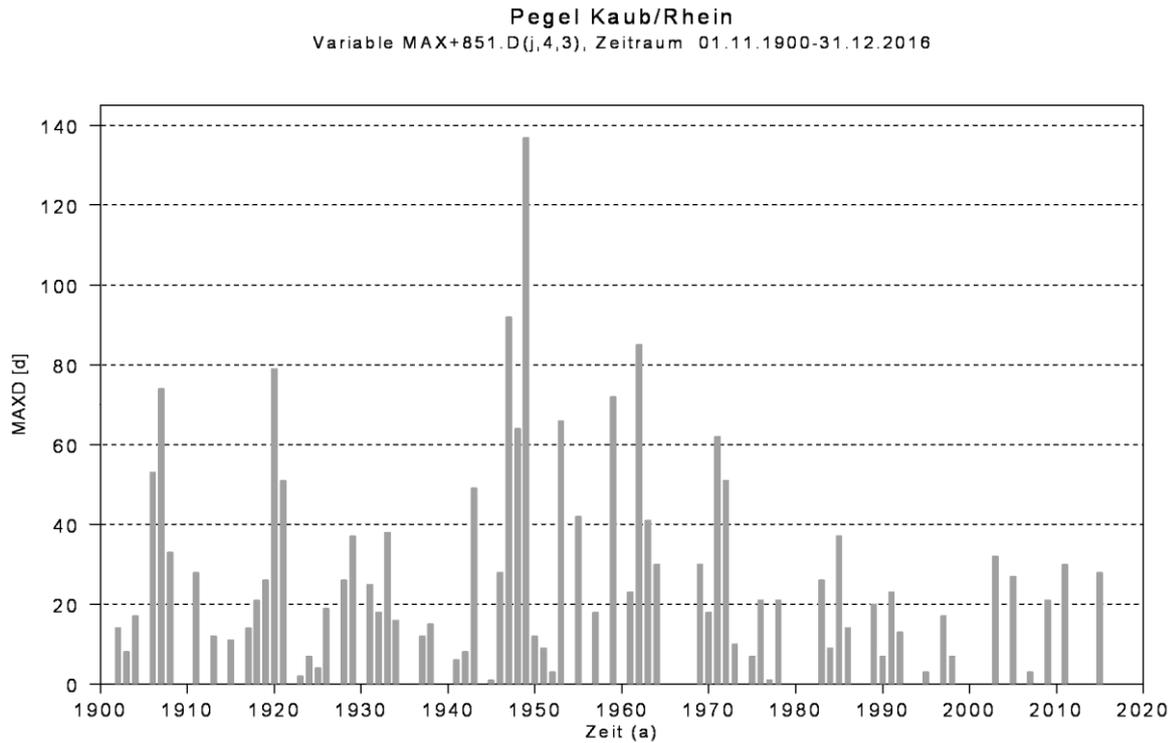
HLNUG 2017

Pegel Mainz/Rhein
 Variable MAX+850.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1930-31.12.2016



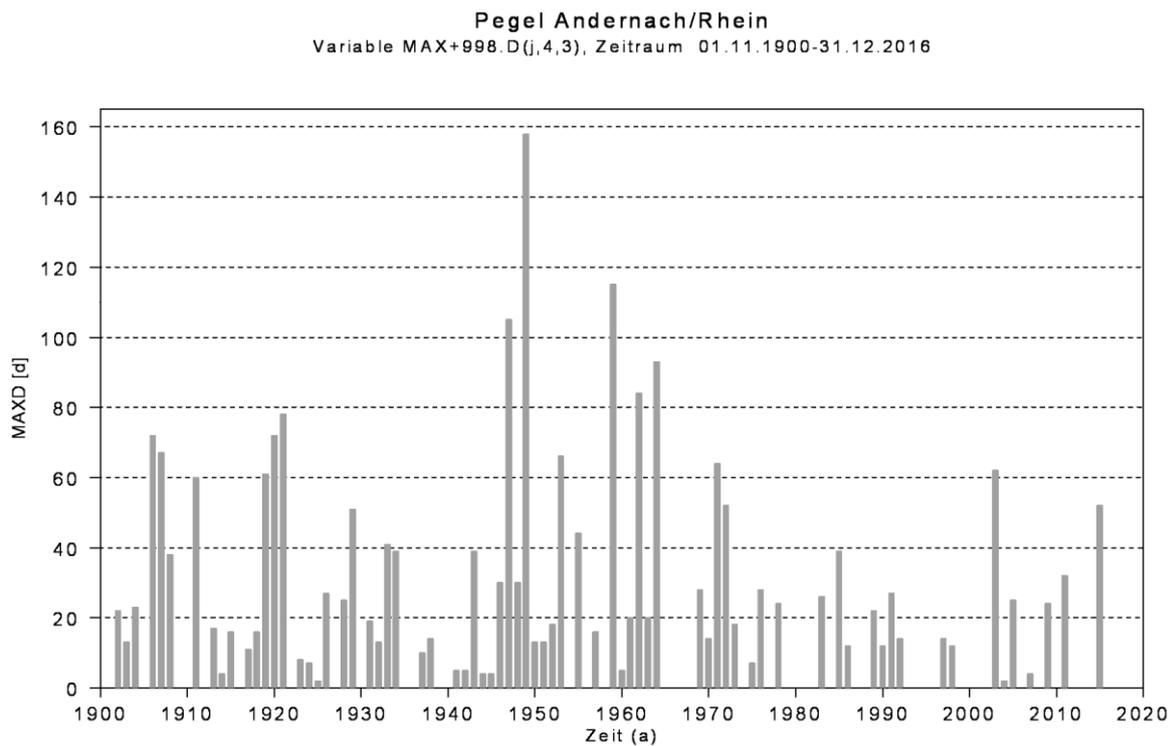
HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017



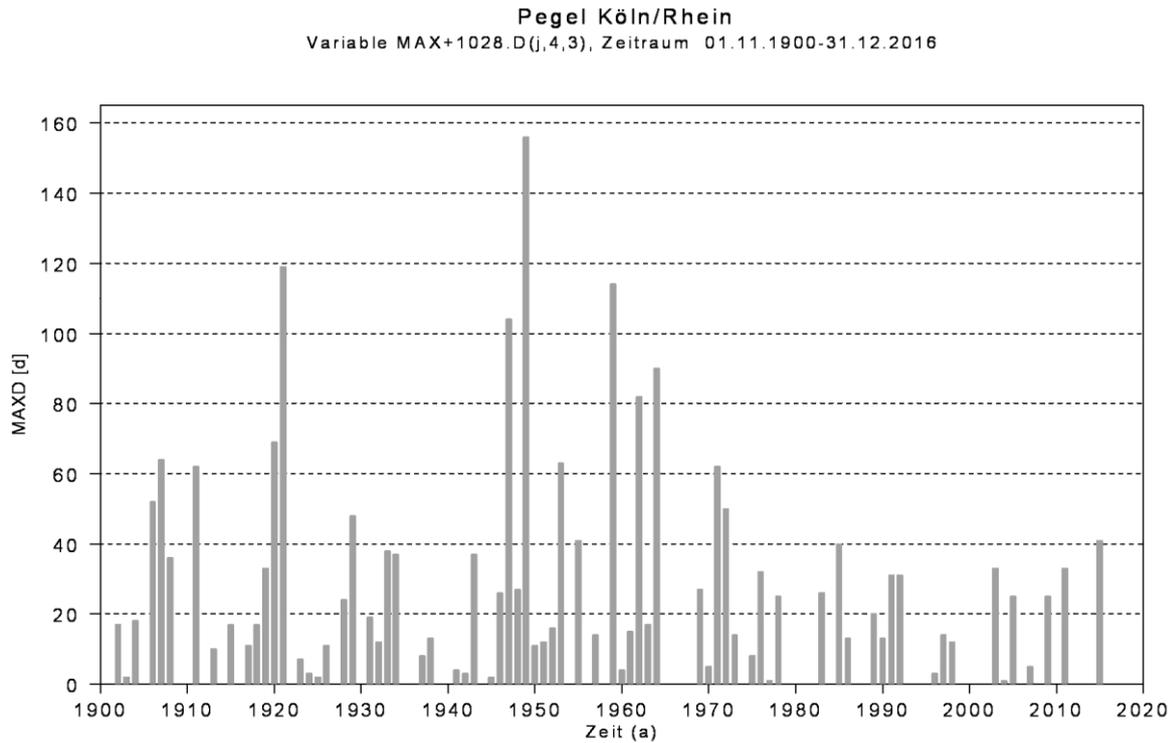
HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017



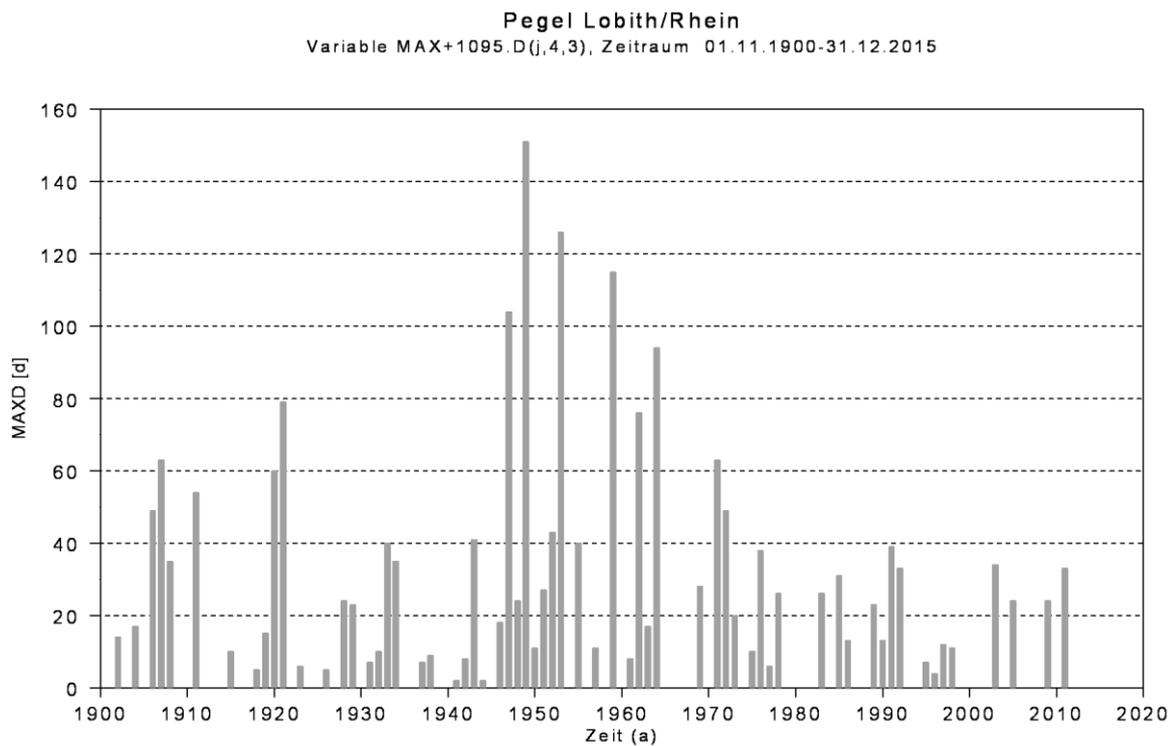
HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

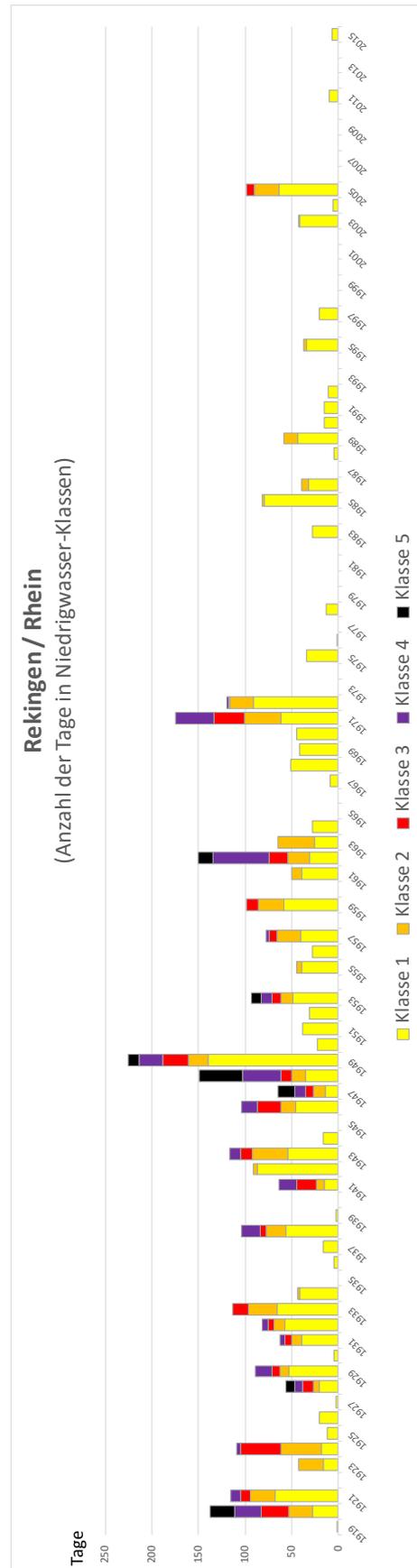
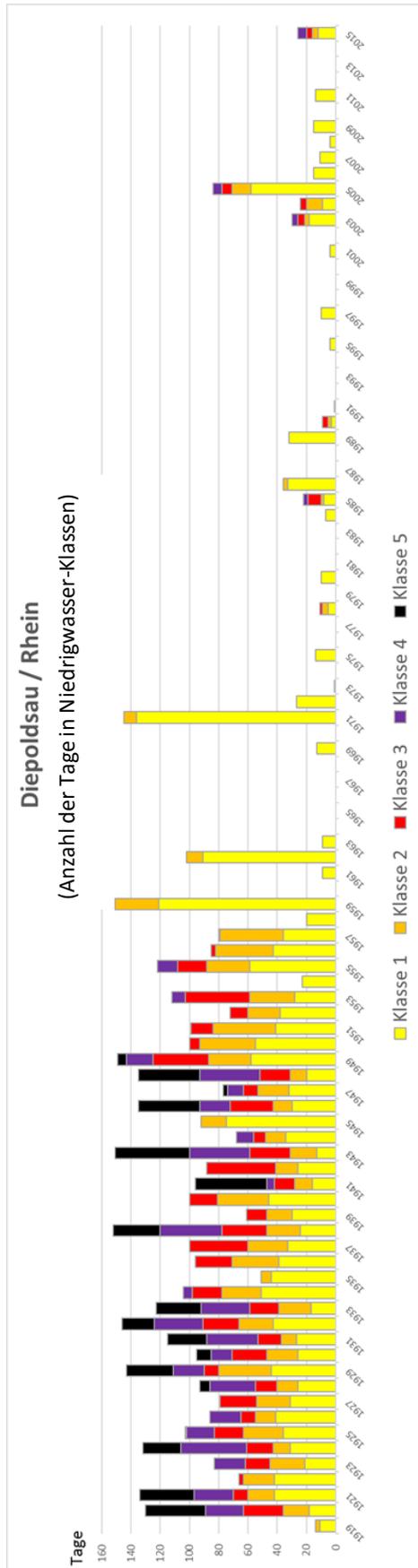


HyStat HQ/NQ 3.0

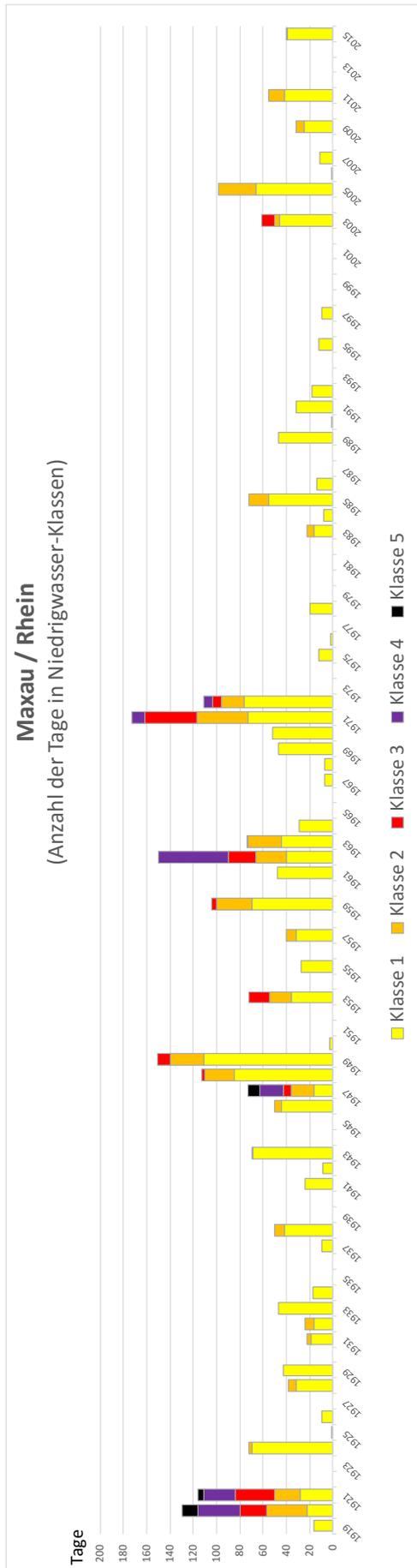
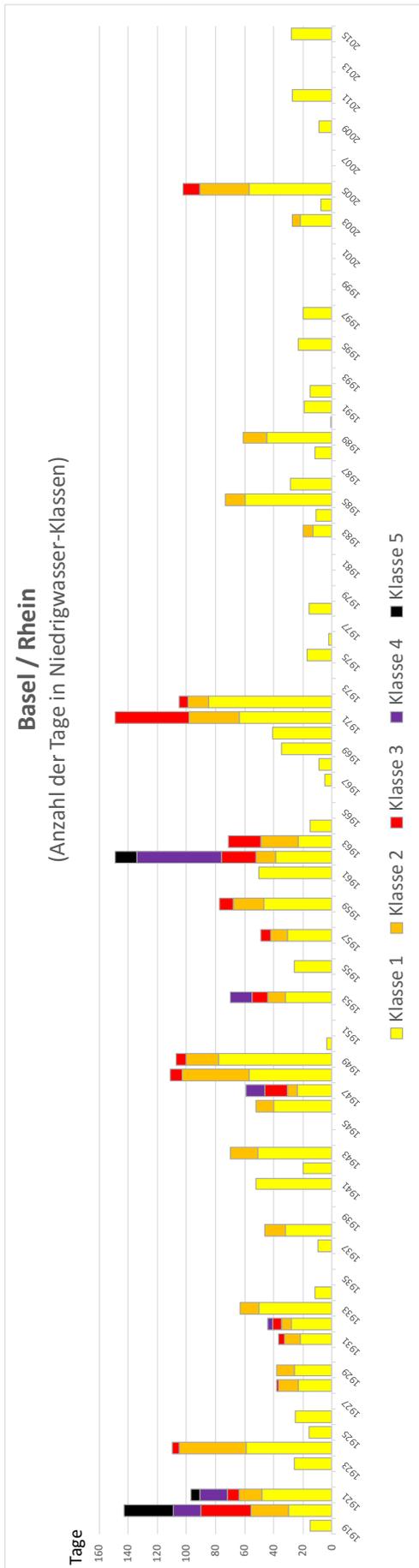
HLNUG 2017

Anlage 4: Validierung der Niedrigwasserklassifizierung mittels der historischen Zeitreihen

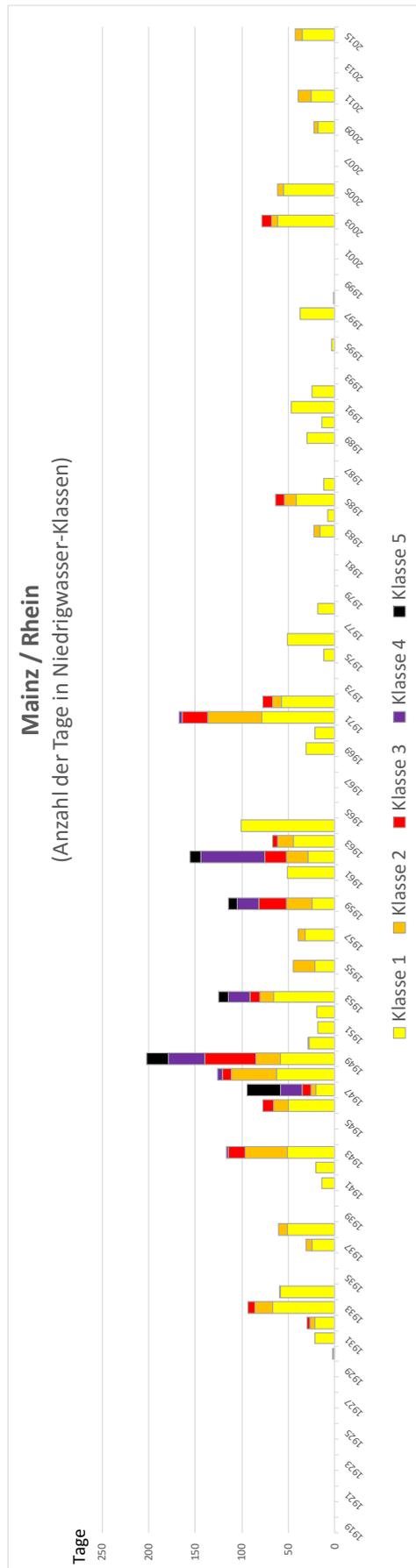
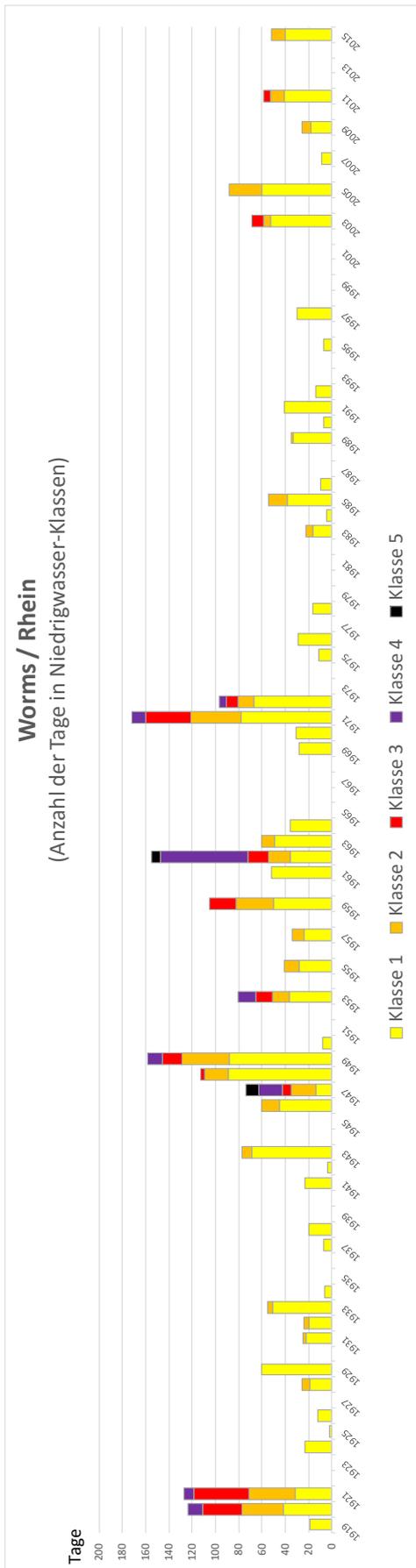
Retrospektives Monitoring Pegel Diepoldsau und Rekingen



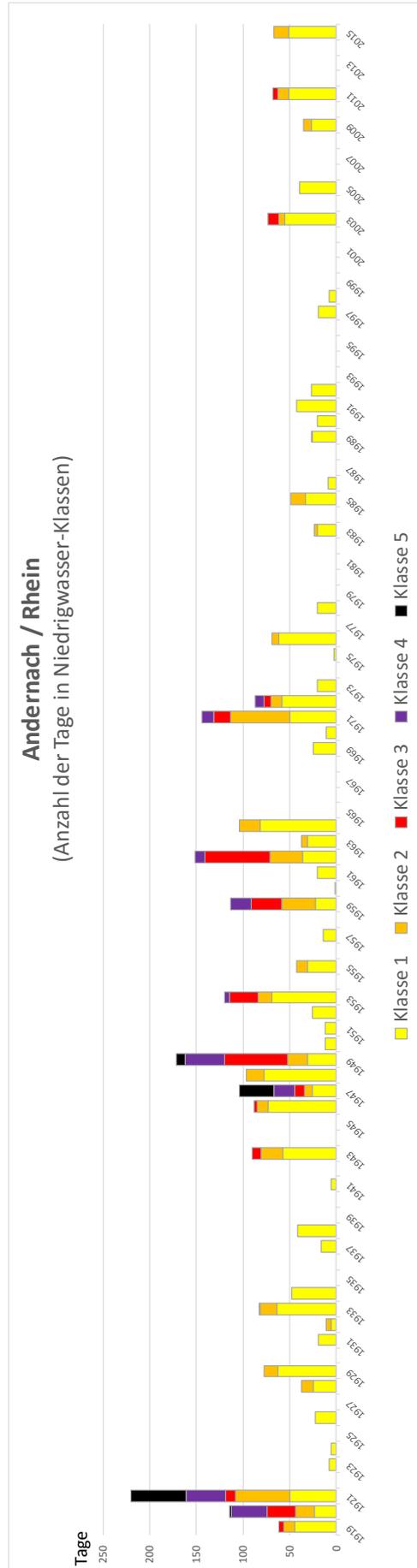
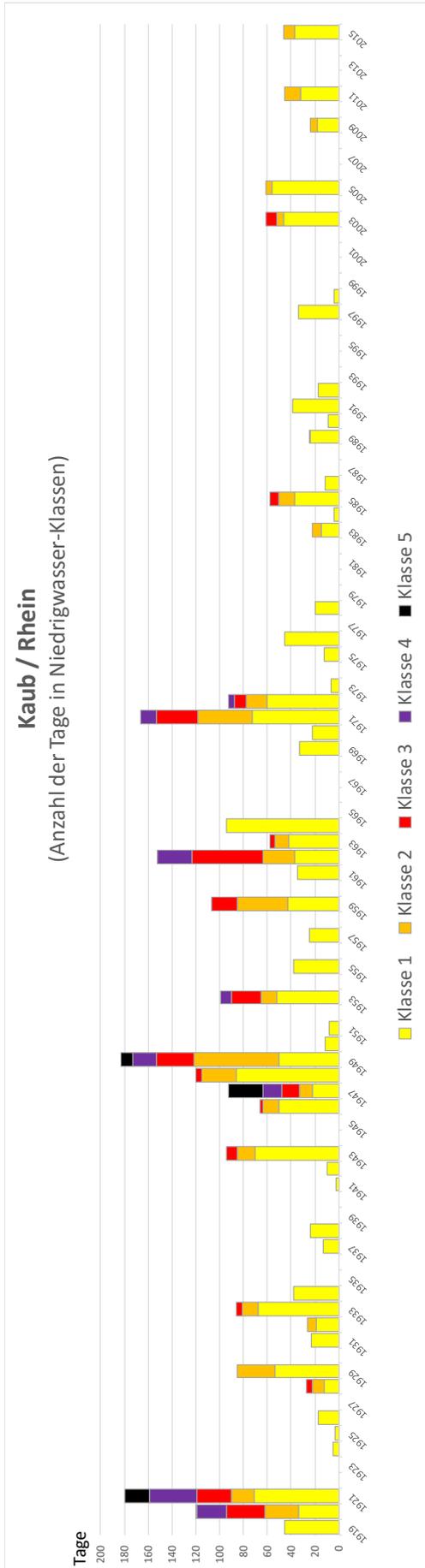
Retrospektives Monitoring Pegel Basel und Maxau



Retrospektives Monitoring Pegel Worms und Mainz



Retrospektives Monitoring Pegel Kaub und Andernach



Retrospektives Monitoring Pegel Köln und Lobith

