

# 7 Hoch- und Niedrigwasserabflüsse

## 7.1 Entwicklung in der Zukunft

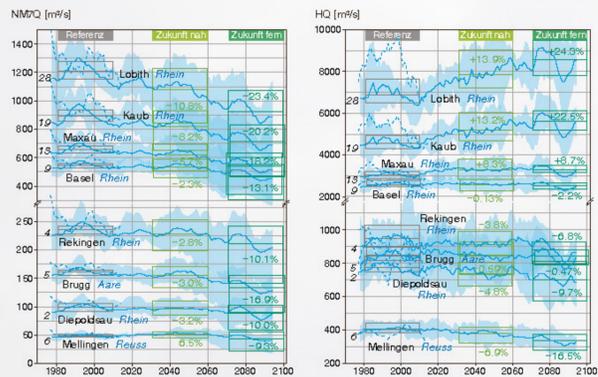


Abbildung 18: Zeitreihen der simulierten jährlichen maximalen Tagesmittel (HQ) und 7-Tage-Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) an ausgewählten Pegeln dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel.

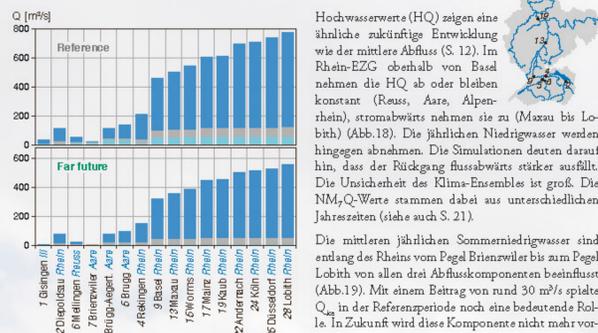


Abbildung 19: Ensemble-Mittel der simulierten mittleren jährlichen Niedrigwasserabflüsse von April-Oktober und zugehörige Abflusskomponenten.

## 5 Veränderte Saisonalität hydrologischer Regime und der Abflusskomponenten

Entlang des Rheins ändert sich das Abflussregime (Abb. 15). Von den Quellgebieten zur Mündung entwickelt sich das Regime, d.h. die jahreszeitliche Abflussvariante, von einem Gletscher- und Schneeschmelze-dominierten Regime mit Spitzen im späten Frühjahr und Sommer (z.B. Weiße Lütische unten) über ein komplexes Regime mit einer gedämpften Spitze (Rhein bei Maxau) zu einem von Niederschlägen dominierten Regime stromabwärts mit Spitzen im Winter (Rhein bei Lobith). Diese gegensätzlichen Regime werden sich den

Projektionen zufolge in Zukunft allmählich ändern (Abb. 15), wobei die Frühjahrs-Sommer-Spitzen abnehmen, die pluvialen Winterspitzen annehmen werden. Niedrigwasserabflüsse werden abnehmen und zu einem früheren Zeitpunkt im Herbst auftreten.

Die Simulationen zeigen unterschiedliche Größenordnungen der Veränderungen in verschiedenen Jahreszeiten und an verschiedenen Pegeln. Abbildung 16 auf der nächsten Seite kombiniert eine Ansicht der Regime (Saisonalität) mit Veränderungen in der Zukunft. Insgesamt dominieren abnehmende Trends die simulierten Änderungen in den Sommermonaten an allen Pegeln. Die von der Schnee- und Eisschmelze dominierten Regime der alpinen Zuflüsse (z.B. Aare und Reuss) zeigen von Mai bis Oktober (höchster Abfluss) die größten Veränderungen. Deutlich sind Abflussrückgänge von Juli bis September. Flussabwärts zeigen die meisten Wintermonate steigende Abflusstrends.

Die Komponenten helfen, die Veränderungen zu erklären und zu quantifizieren. Die Aare bei Brienzwilz z.B. sammelt die Zuflüsse aus dem größten vergleichbaren Gebiet im Rheingebiet. Ihr Abfluss enthält von allen hier vorgestellten Pegeln den größten Anteil an  $Q_{\text{Schnee}}$ . Diese Komponente wird in naher Zukunft stark abnehmen, mit einem hauptsächlich lokal und saisonal relevanten Effekt.

Eine wichtige Komponente des Abflusses im Gesamtgebiet ist jedoch  $Q_{\text{Regen}}$ . Die Abnahme dieser Komponente in Zukunft wirkt sich vor allem auf die saisonal verzögerten Beiträge flussabwärts aus. Der Effekt der Komponente wird im modellierten hydrologischen System verzögert. Schneedominierte Regime wie der Rhein bei Basel zeigen auch im Frühsommer, d.h. während der Schneeschmelze, stark abnehmende Trends. In Basel nimmt der Abfluss bereits im Juni ab.

Die Rheinflüsse aus den Mittelgebirgen in Deutschland und Frankreich (z.B. Kinzig und Mosel) zeigen insgesamt keine starken Veränderungen, aber der relative Anteil von  $Q_{\text{Regen}}$  nimmt deutlich ab und wird vor allem im Winter durch Zunahmen von  $Q_{\text{Regen}}$  kompensiert. Zusammenfassend lässt sich für den Rhein sagen, dass  $Q_{\text{Regen}}$  und  $Q_{\text{Schnee}}$  zwar abnehmen, ihr Effekt auf den Gesamtabfluss (siehe Abb. 8, S. 12) flussabwärts jedoch durch eine Zunahme von  $Q_{\text{Regen}}$  geringer ist.

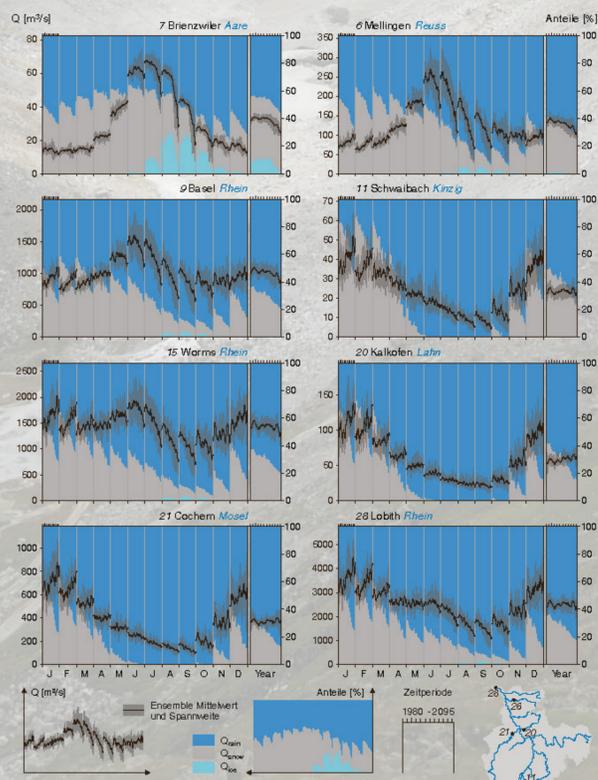


Abbildung 16: Zeitreihen der modellierten Abflüsse und der prozentualen Anteile der Abflusskomponenten  $Q_{\text{Regen}}$ ,  $Q_{\text{Schnee}}$  und  $Q_{\text{Regen}}$  für jeden Monat des Jahres sowie für die jährlichen Werte für die Periode 1981-2100 (11-jährige gleitende Mittel). Die Abflussanteile der Komponenten entsprechen dem Ensemble-Mittelwert.

## 7.2 Variabilität und Saisonalität

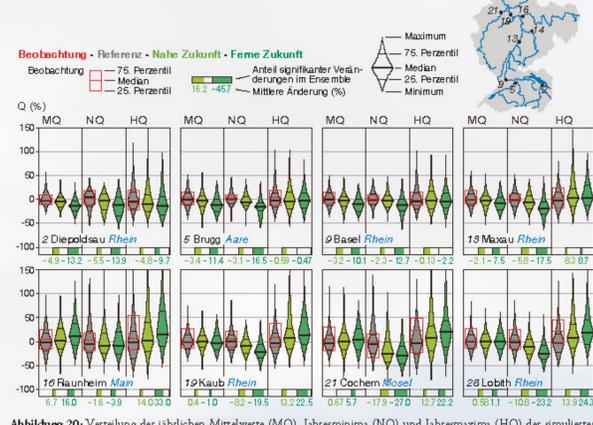


Abbildung 20: Verteilung der jährlichen Mittelwerte (MQ), Jahresminima (NQ) und Jahresmaxima (HQ) der simulierten Abflüsse der sieben Ensemblemitglieder an ausgewählten Pegelstellen für die 30-Jahresperioden (730 Werte) sowie Beobachtungsdaten für die Referenzperiode, dargestellt als relative Veränderungen vom Mittelwert der Referenzperiode.

MQ, HQ und NQ sind wichtige Abflusskenngrößen. Ihre Verteilungen bilden die Basis hydrologischer Planung. Die Simulationen und beobachteten (gemessenen) relativen Kennwerte zeigen im Referenzzeitraum am Rhein bis Maxau eine gute Übereinstimmung (Abb. 20). In den Zuflüssen Main und Mosel weichen die Extreme jedoch stärker ab (siehe S. 8), was sich beim HQ auch am Rhein bei Lobith auswirkt.

Relative Veränderungen in diesen Kenngrößen können aus den Simulationsergebnissen jedoch gut analysiert werden. Die als Box-Perzentil-Diagramme dargestellten Verteilungen zeigen die Abflusskenngrößen im Vergleich zu ihrem Mittelwert im Referenzzeitraum (Abb. 20). Die zukünftigen Veränderungen der mittleren MQ sinkt für den Rhein bei Diepoldsau und steigt für den Main bei Raunheim und die Mosel bei Cochem. Die meisten Pegel zeigen dieses Änderungsmuster.

Die Änderungen des jährlichen NQ sind deutlicher. Mit nur zwei Ausnahmen zeigen alle Pegel bereits für die Nahe Zukunft deutlich niedrigere NQ. Auch die Varianz der NQ ändert sich für die Zuflüsse aus den Alpen und den Mittelgebirgen. Für die ferne Zukunft sinken die NQ für die meisten Pegel entlang des Rheins signifikant zwischen 10 und 25%. Einige kleinere Nebenflüsse zeigen sogar eine Abnahme der NQ um bis zu 50%.

Die Veränderungen der jährlichen Höchstwerte (HQ) sind im Rheineinzugsgebiet flussabwärts von Basel am deutlichsten. Pegel des Hauptstroms und der Nebenflüsse zeigen eine signifikante Zunahme des Mittelwerts und der Varianz der HQ sowohl für die Nahe als auch für die ferne Zukunft. Diese Änderungen können mit HQ-Anstiegen zwischen 10 und 33% etabliert sein. Für alle Pegel flussabwärts von Basel wurde keine wesentliche Änderung der HQ simuliert. Bei signifikanten Änderungen, wie z.B. am Rhein bei Diepoldsau, nehmen die jährlichen HQ zu und deren

Varianz ab. Ein Teil dieser Veränderungen kann durch die Veränderungen der Saisonalität erklärt werden. Das zeitliche Auftreten der jährlichen HQ und NQ (Abb. 21) ist für die saisonalen Nutzungen des Flusses und für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials durch Extremereignisse relevant.

Das saisonale Auftreten von NQ ändert sich an den Pegeln der Aare in Brugg und des Rheins in Basel, Maxau und Kaub am stärksten. Diese Veränderung steht im Zusammenhang mit den Veränderungen im hydrologischen Regime (S. 16/17). Die Simulationen deuten auf eine Verschiebung der winterrlichen Niedrigwasser zu diesem Pegeln in naher Zukunft auf den frühen Winter und in ferner Zukunft sogar auf den Spätherbst. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Niedrigwasser im Sommer, einer Jahreszeit, in der es in der Vergangenheit kein Niedrigwasser gab, wird zunehmen. In den hochalpinen Einzugsgebieten wird sich die Saisonalität nicht stark verändern. Flussabwärts von Basel wird simuliert, dass Niedrigwasser in naher Zukunft insgesamt einen Monat früher auftritt. Während NQ in den Wintermonaten noch gelegentlich auftreten können, wird die Niedrigwasserzeit im Herbst stärker ausgeprägt sein als im Referenzzeitraum.

Die grundsätzliche Saisonalität der HQ von Dezember bis März bleibt für alle Pegel flussabwärts von Basel, einschließlich der Nebenflüsse, relativ stabil. Für die Pegel am Hauptstrom des Rheins konzentriert sich das Auftreten jedoch stärker auf den früheren Winter. Für die Pegel flussabwärts von Basel wird eine erhebliche Veränderung der Saisonalität der HQ prognostiziert. In den höher gelegenen alpinen Einzugsgebieten wird sich das HQ-Vorkommen vom Sommer zum Frühjahr verschieben. Die Pegel in Basel oder Brugg, wo die Hochwasser durch eine Kombination von Prozessen erzeugt werden, zeigen die stärksten Veränderungen in der Saisonalität. Die typischen Sommerhochwasser der Referenzperiode werden in ferner Zukunft durch Frühjahrs- und Frühwinterhochwasser abgelöst.



Abbildung 21: Kreisdiagramme ausgewählter Messstationen zeigen das zeitliche Auftreten der jährlichen minimalen (NQ) und maximalen (HQ) Abflüsse als Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung um den Referenzzeitraum.

## 7.3 Extreme Niedrigwasserereignisse im Modell-Stresstest

1976, 2003 und 2018 traten im Rhein von Basel bis in die Niederlande markante Niedrigwasserereignisse auf (Abb. 22). Das Ereignis 1976 war Folge einer langen Trockenperiode in Westeuropa, 2003 zeichnete sich durch einen sehr heißen und trockenen Sommer aus und 2018 hatte Aspekte beider früheren Ereignisse. Alle Ereignisse kennzeichneten deutliche Nutzungseinschränkungen.

Die Modelle im ASG Projekt ermöglichen "Stresstests", bei denen diese bekannten Ereignisse in die Zukunft verlegt wurden, um die Frage zu beantworten:

Wären Niedrigwasser stärker ausfallen, falls ähnliche meteorologische Situationen wie 1976/2003/2018 erneut auftreten, jetzt in naher oder ferner Zukunft, d.h. wenn sich die Gletscher stark zurückgezogen haben werden? Diese Stresstests wurden simuliert, indem der meteorologische Input dieser ausgewählten Jahre zu drei späteren Zeitpunkten erneut verwendet wurde, d.h. platziert

- im Simulationsjahr 2018 'Heutzutage',
- im Simulationsjahr 2031: 'Nahe Zukunft',
- im Simulationsjahr 2071: 'Ferne Zukunft'.

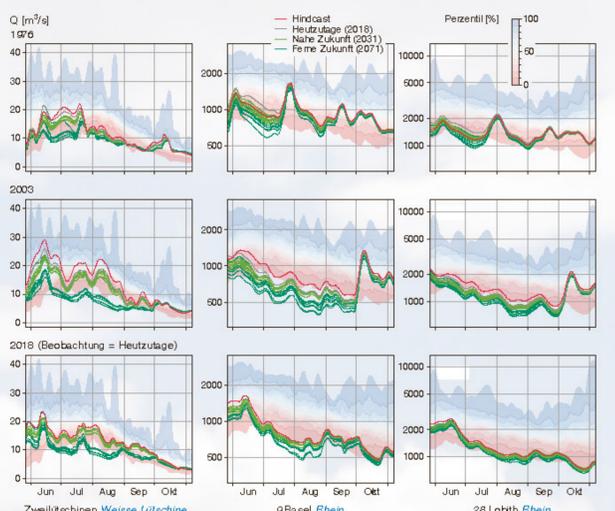


Abbildung 22: Tagesmittel der simulierten Abflüsse von Juni-Oktober dargestellt als 7-tägige gleitende Mittel der Niedrigwasserjahre in der Vergangenheit und ihre Wiederholung als Stresstest in der Zukunft (siehe Ensemblemitglied) für drei ausgewählte Pegel (Spitzen). Zu beachten sind die logarithmischen Y-Achsen für Lobith und Basel. Im Hintergrund zeigen die Abflussperzentile die Verteilung für die Periode 1974-2019.

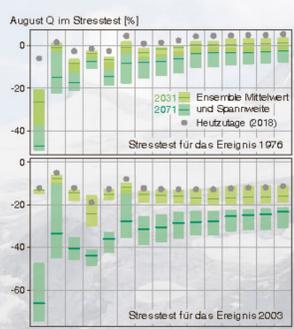


Abbildung 23: Abflussveränderungen im Monat August für die Stresstests für Pegel entlang des Rheins, dargestellt als relative Veränderungen zum jeweiligen Mittelwert der Referenzperiode.

Die Ergebnisse dieser Stresstests können mit den historischen Beobachtungen und mit der Hindcast-Simulation verglichen werden (Abb. 22). Dabei zeigt sich, dass die bekannten Niedrigwasserereignisse noch extremer werden, wenn sie in der Zukunft wieder auftreten. Für die Fälle des meteorologischen Trockenstresses von 2003 und 2018 würden die sommerlichen Abflüsse in den Simulationen so niedrig, dass sie außerhalb des Bereichs der beobachteten Niedrigwasser von 1974-2019 liegen. Diese extreme Reaktion tritt vor allem im August und September auf, wenn auch  $Q_{\text{Regen}}$  in der Zukunft geringer ist. Die absolute Auswirkung des reduzierten Abflusses ist in den alpinen Kopfneigungsgebieten (z.B.

Weiße Lütische) größer. Hier macht die Gletscherschmelze einen großen Anteil des Abflusses aus. Das Niedrigwasser wird jedoch flussabwärts extremer, da dort die Empfindlichkeit gegenüber Trockenperioden größer ist.

Entlang des Rheins unterscheiden sich die simulierten Auswirkungen der meteorologischen Trockenheit der Jahre 1976, 2003 und 2018 (Abb. 23). Die größten relativen Änderungen des August-Abflusses treten in den alpinen Nebenflüssen und den Oberläufen auf, wobei insbesondere für die Stresstests 2003 und 2018 in der fernen Zukunft Abnahmen von über 30% zu verzeichnen sind. Die Spannweite der Änderungen der Augustabflüsse für die Nahe und ferne Zukunft aufgrund der verschiedenen Klimamodelle wird durch die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen und Studien des Gletscherrückgangs (S. 13) vergrößert.

Platziert man das meteorologische Stressjahr an eine andere Stelle in der Zeit, können andere Ausgangsbedingungen herrschen als in der realen Vergangenheit. Im Fall des Stressjahres 1976 führte ein solcher Effekt durch größere Schneedecken im Frühsommer zu einer positiven Veränderung des Abflusses (Abb. 23a). Negative Änderungen dominieren jedoch – am stärksten für das Stressjahr 2003, für das in der Zukunft Abnahmen des Augustabflusses von 30-60% simuliert wurden. Das Stressjahr 2018 führte zu einer Verringerung des Abflusses um 10-20% im Vergleich zu den geringeren Veränderungen im Jahr 1976. Die Ergebnisse lassen sich auf die Unterschiede in der ursprünglichen Niedrigwasserjahre zurückführen, die 2003 am höchsten war, gefolgt von 2018 (Tabelle 2). Insbesondere im Jahr 2003 verursachte eine starke Hitzewelle eine große Menge an Eisschmelze.

Tabelle 2:  $Q_{\text{Regen}}$  Anteil für den Tag, an dem dieser gemäß der Hindcast-Simulation des jeweiligen Niedrigwasserjahres maximal war, und dazugehörige Werte aus den Stresstests.

Datum	Q <sub>Regen</sub> [m³/s]	Stresstests		
		heutige Nahe Zukunft	nahe Zukunft	ferne Zukunft
1976				
W. Lütische	10. Okt	39,4	29,6	26,7
Basel	18. Juli	5,6	1,9	1,8
Lobith	9. Aug	3,2	1,6	1,5
2003				
W. Lütische	13. Aug	63,7	60,5	58,7
Basel	27. Aug	18,6	17,2	14,5
Lobith	28. Aug	12,1	11,0	9,2
2018				
W. Lütische	21. Sep	47,8	-	40,0
Basel	28. Aug	10,0	-	8,5
Lobith	28. Aug	6,2	-	6,3

## 8 Wassernutzung unter veränderten Bedingungen: Beispiele entlang des Rheins

In der wasserwirtschaftlichen Praxis werden Abflusskenngrößen und -grenzwerte für viele Zwecke eingesetzt. Solche Grenzwerte könnten zukünftig häufiger oder seltener erreicht werden. Die folgenden Beispiele veranschaulichen anhand der Simulationsergebnisse mögliche Änderungen hinsichtlich einiger Grenzwerte entlang des Rheins.

Ein definierter Mindestabfluss dient dem Schutz der Gewässerökologie wie z.B. bestimmter Fischabitate. In der Schweiz und in Österreich ist hierfür der  $Q_{347}$  bezeichnet, die Grundlage im Schweizer Gewässerschutzgesetz ist  $Q_{347}$  der Abfluss, der in 95% der Zeit erreicht oder überschritten wird, entsprechend 347 Tagen in einem durchschnittlichen Jahr; er wird von einer zehnjährigen Referenzperiode abgeleitet. Andere Länder können andere Bezugszeiträume verwenden.

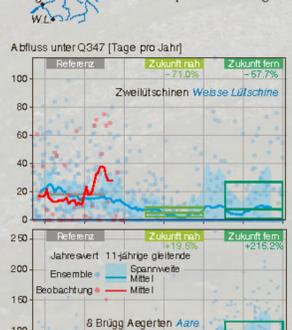


Abbildung 24: Dauer von Perioden mit Abflüssen geringer als der  $Q_{347}$  der Referenzperiode (1981-2010) für ein kleines vergleichbares Kopfneigungsgebiet (oben) und für die Aare (unten).



einem durchschnittlichen Jahr; er wird von einer zehnjährigen Referenzperiode abgeleitet. Andere Länder können andere Bezugszeiträume verwenden.

Zwei Beispielgebiete (Abb. 24) weisen unterschiedliche Veränderungen in der Anzahl der Tage pro Jahr mit Abflüssen unterhalb des für die Referenzperiode abgeleiteten  $Q_{347}$  auf. In dem vergleichbareren Kopfneigungsgebiet, der Weißen Lütische, wo Niedrigwasser im Winter auftritt, nehmen Perioden mit Abflüssen  $< Q_{347}$  ab. Flussabwärts, in der Aare, wo Niedrigwasser gewöhnlich im Spätsommer auftritt, wird die Dauer zu nehmen, in naher Zukunft um beinahe 20%, in ferner Zukunft jedoch stark um >200%. In einigen Gebieten zwischen 1500 und 2000 m NN wird sich die Niedrigwasserzeit dabei von einem winterrlichen zu einem spätsommerlichen oder herbstlichen Niedrigwasserregime verschieben, was entsprechend ökologisch relevant sein mag (S. 21; FOEN, 2021; Muelchi et al., 2021).



Am Stauwehr Kembs in der Nähe von Basel wird der größte Teil des Obertheins in den Grand Canal d'Alsace in Frankreich geleitet, wo er für die Wasserkraftproduktion, die Schifffahrt und als Kühlwasser genutzt wird. Die erzeugte Laufwasserkraft wird von Frankreich und der Schweiz gemeinsam genutzt. Ausgehend von Grenzwerten für die derzeitige Restwasserregulierung des "Altheins" und der Kapazität des Kraftwerks lässt sich aus den Zukunftsprojektionen die jährlich potenziell für die Energieerzeugung verfügbare Wassermenge ableiten (Abb. 25). Dies deutet auf eine nur geringe Abnahme des Wasserkraftpotenzials in der nahen Zukunft hin, aber auf eine deutlichere Abnahme um etwa 10% gemäß dem Ensemble-Mittel für 2071-2100.



Beschränkungen von Schifffahrt und Güterverkehr über längere Zeit herrschen z.B. im Niedrigwasserjahr 2018. Dies kann weitreichende Auswirkungen auf andere Sektoren haben. Bei extremen Abflussverhältnissen sind Abschnitte des Mittelrheins kritisch und der Pegel Kaub fungiert als wichtiger Indikator. Die projizierte Verschärfung von Extremen (S.19 ff) führt zu längeren Perioden mit Einschränkungen. Ausgehend von aktuell geltenden Grenzwerten könnte es gegen Jahrhundertende für durchschnittlich mehr als zwei Monate pro Jahr zu Schifffahrtseinschränkungen kommen.

Der Abfluss am Pegel Lobith ist einer der wichtigsten Indikatoren im nationalen Trockenheitsüberwachung- und Frühwarnsystem der Niederlande. Unterhalb eines bestimmten Abflusses wird die Warnstufe 1 ausgelöst. Beim derzeitigen Klima liegt dieser Grenzwert je nach Jahreszeit zwischen 1000 und 1400 m³/s (WMCN, 2021). Nach den Simulationen sind in Zukunft wesentlich längere Perioden mit Abflüssen unterhalb dieser Schwelle zu erwarten (Abb. 25).

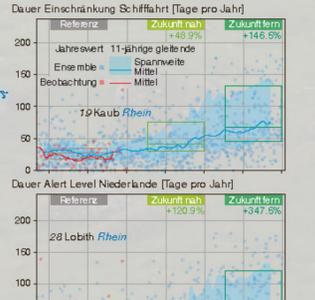


Abbildung 25: Verfügbare Abflussmenge am Pegel Basel zur Wasserkraftproduktion in Kembs. Dauer von Schifffahrtseinschränkungen am Pegel Kaub und Dauer von Perioden mit Abflüssen unterhalb des niederländischen Dürreschwellen-Niveaus 1 am Pegel Lobith.