

Untersuchung zu den Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen auf die Gewinnungskapazitäten eines Wasserversorgungsunternehmens am Rhein

Vor dem Hintergrund der in den letzten Jahren gehäuft auftretenden Extremwetterlagen und entsprechenden Klimaprognosen hat sich die Notwendigkeit ergeben, die Robustheit der Gewinnungsanlagen der Düsseldorfer Wasserversorgung auf den Prüfstand zu stellen. Das hydraulische Regime der Wassergewinnung ist im Wesentlichen vom Wasserstand des Rheins abhängig. Mit der Auswertung der Betriebserfahrungen insbesondere im Jahr 2018 und der Hinzuziehung aktueller Klimaprojektionen, ergänzt um theoretische Worst-Case-Szenarien, wurde die Leistungsfähigkeit der Pumpwerke ermittelt und dargestellt. Die Auswertung bescheinigt den Wassergewinnungsanlagen auch während extremer Niedrigwasserphasen eine dem Bedarf entsprechende Leistungsfähigkeit. Auswirkungen auf die Qualität der Ressource wurden ebenfalls betrachtet.

von: Dr. Björn Droste, Stefan Kamphausen & Pegah Kamkar
(alle: Stadtwerke Düsseldorf AG)

Geringe Grundwasser- und Flusspegelstände stellen aktuell und zukünftig eine Herausforderung für die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung dar. Dies gilt insbesondere, wenn die Spitzenabgaben in den Sommermonaten mit extrem niedrigen Pegelständen – und somit auch mit niedrigen Wasserständen in den Gewinnungsanlagen – einhergehen. Zur Überprüfung der Risikofaktoren bei der Düsseldorfer Trinkwasserversorgung wurden die 15 Vorlandpumpwerke der Wassergewinnung (SWD AG + NBG GmbH) auf ihre hydraulisch-technische Leistungsfähigkeit bei Niedrigwasser untersucht und dem maximalen Rohwasserbedarf bzw. der maximalen Aufbereitungskapazität der Wasserwerke gegenübergestellt. Bei den Brunnenanlagen handelt es sich um drei Vertikalbrunnengalerien mit Heberkonstruktion und Sammel-schacht sowie zwölf Horizontalfilterbrunnen.

Ebenfalls betrachtet wurde die Auswirkung von Niedrigwasserphasen auf die Hydrochemie. Ziel der Untersuchungen war die Festlegung von Strategien zur Minderung von Auswirkungen bei Niedrigwasser- und Hitzeperioden (Niedrigwasservorsorge und Niedrigwassermanagement). Die Niedrigwasservorsorge umfasst alle Maßnahmen, die geeignet sind, das Ausmaß und die Wirkung von Niedrigwasserereignissen im Vorfeld zu minimieren, wohingegen das Niedrigwassermanagement die Schäden und die Auswirkungen des Niedrigwassers durch operative Steuerungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen minimieren soll.

Wetterereignisse und Klimaentwicklung

In den letzten zwei Jahrzehnten ist es zu einer Häufung von extremen Wetterereignissen gekommen. Modellrechnungen in der Niederrheinregion [1] gehen in diesem Kontext mindestens von einer Verdoppelung der Anzahl heißer Tage mit Temperaturen über 30 °C und einem deutlichen Rückgang der sommerlichen Niederschlagsmengen (um 5 bis 30 Prozent) in der nahen (2021–2050) bis zur fernen Zukunft (2071–2100) aus. Demnach steigt die Wahrscheinlichkeit, dass solche Extremwetterjahre, wie wir sie in den Jahren 2003, 2018, 2019 und im vergangenen Jahr 2022 erlebt haben, auch weiterhin regelmäßig auftreten (Abb. 1).

Im Herbst 2018 führte der Rhein über mehrere Wochen extremes Niedrigwasser. Der niedrigste Wasserstand wurde in Düsseldorf am 23. Oktober 2018 beobachtet und lag bei 23 cm – und folglich rund drei Meter unter dem langjährigen Mittel. Mit einer Abflussmenge von nur 641 Kubikmeter pro Sekunde (m^3/s) wurden die bisher geringsten Abflüsse von 530 m^3/s aus dem Jahr 1947 und 464 m^3/s aus dem Jahr 1929 geringfügig überschritten. Der mittlere Rheinabfluss bei Düsseldorf beträgt normalerweise 2.200 m^3/s .

Im vergangenen Jahr 2022 trat das Niedrigwasser im Rhein schon sehr früh ab Anfang August ein und überschritt sich dadurch mit dem Zeitraum, in dem hohe Wasserabgaben wahrscheinlich sind (Abb. 1). Das frühere Ende der Schneeschmelze und verringerte Gletscherabflüsse sind hierfür Faktoren, die sich in der Zukunft voraussichtlich weiter verschärfen werden.

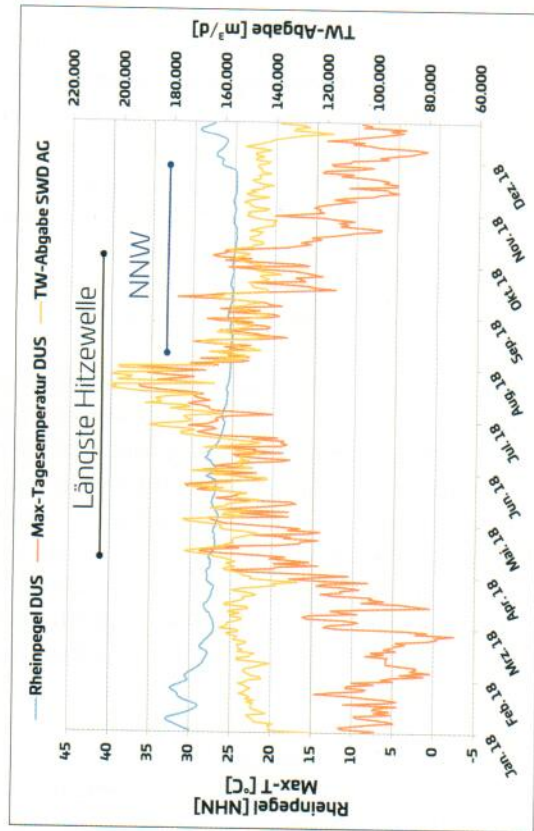
Untersuchungen zu den Auswirkungen des Rheinabflussverhaltens unter Berücksichtigung des Klimawandels (BMVI-Forschungsprogramm KLIWAS) haben ergeben, dass in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) für den mittleren Monatsabfluss in Düsseldorf Abnahmen zwischen 5 und 30 Prozent im Sommer zu erwarten ►

Brunnengalerie des
Wasserwerks Flehe am Rhein

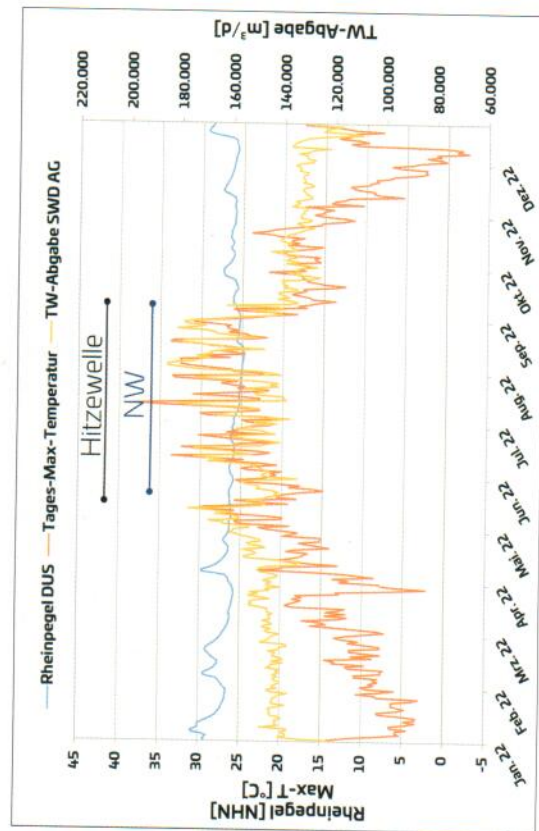
sind (Worst-Case-Szenario: $\sim 500 \text{ m}^3/\text{s}$). Ähnliche Spannbreiten der Änderungen sind im Kontext des Forschungsprogrammes BMDV-Expertennetzwerk beim Multi-Modell-Ensemble von

Klimamodellsimulationen für den Zeitraum 1971-2099 erstellt wurden. In **Abbildung 2** ist die Änderung des mittleren Niedrigwasserstandes (MNW), dargestellt als 30-jährig gleitender

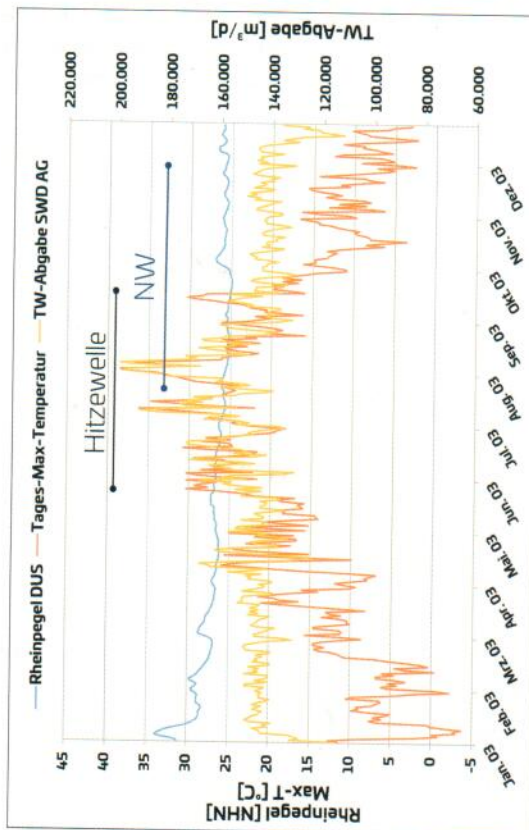
2018



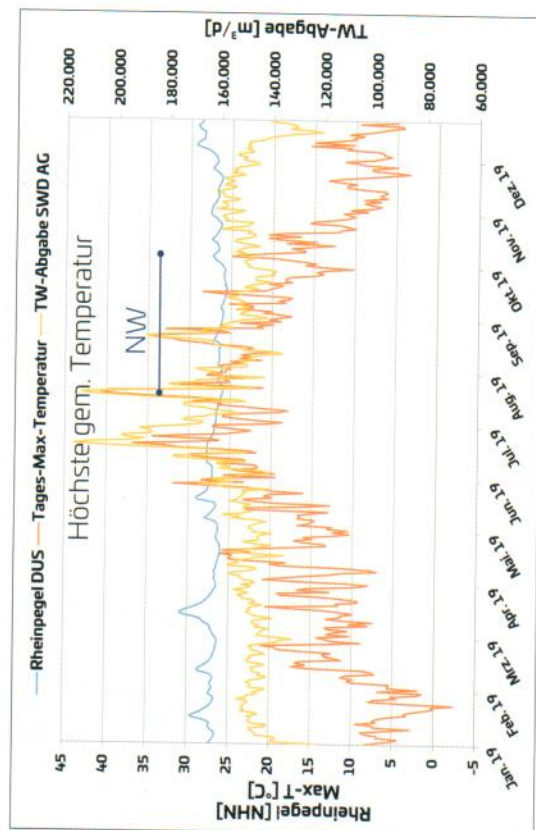
2022



2003



2019



Quelle: SWD AG

Abb. 1: Extremwetterjahre in Düsseldorf: Temperatur- und Rheinverlauf sowie Trinkwasserabgabe

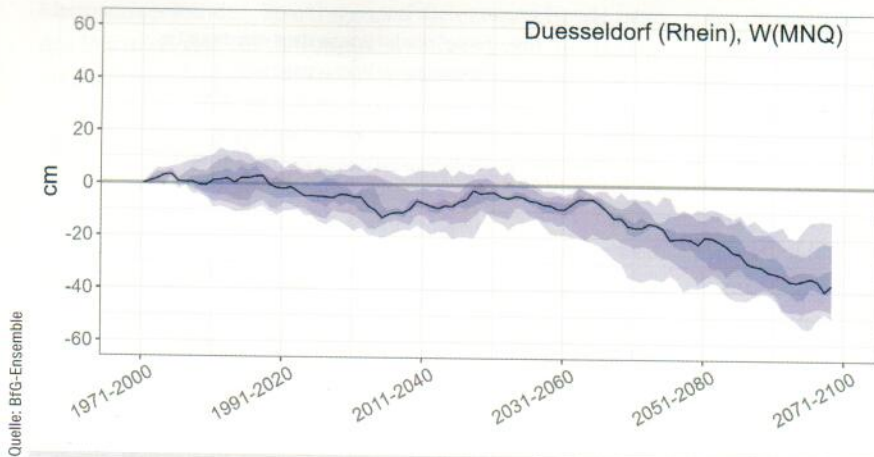


Abb. 2: Änderung des mittleren Niedrigwasserstandes beim ungünstigsten Klimaszenario RCP 8,5 bis in das Jahr 2100 mit Perzentilen des Ensembles (Hell- bis Dunkellila: 15./85., 25./75., 40./60., 50 bzw. Median)

Mittelwert in der Gegenwart und Zukunft, gegenüber dem Bezugszeitraum 1971 bis 2000 dargestellt. Die Projektionen basieren dabei auf dem Hochemissionsszenario RCP8.5. Die Prognosen zeigen eine mögliche Abnahme des Wasserstandes um bis zu 50 cm an. Für die durchgeführten Betrachtungen zu den Gewinnungskapazitäten wurden weitere 50 cm als Sicherheitszuschlag gewählt, sodass die Anlagen für einen Wasserstand von einem Meter unter dem von 2018 überprüft wurden.

Ermittlung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Brunnenanlagen

Die Betriebswasserstände in den Brunnenschächten werden von der Entnahmemenge und dem Rheinwasserstand beeinflusst (im Mittel 75 Prozent Uferfiltratgewinnung). In Ab-

bildung 3 sind die Verhältnisse der Wassergewinnung für ein Pumpwerk mit Horizontalfilterbrunnen im Schnitt dargestellt. Die Tiefenlage der Filterstränge, die gute Durchlässigkeit des Untergrundes und damit die gute hydraulische Anbindung an den Rhein ermöglichen die Wassergewinnung auch bei dem betrachteten extremen Szenario (NNW 2018 minus 1,0 m). Gegenüber dem Niedrigwasser von 2018, bei dem die Wassertiefe im Rhein bei 2,8 m lag, wären dann noch 1,8 m Wassertiefe vorhanden. Zum Vergleich: Bei Mittelwasser sind es ca. 5,1 m.

Der Wasserstand im Rhein korrespondiert direkt mit der Absenkung des Wassers-

stands in den Brunnen und beeinflusst damit auch die technisch gewinnbare Menge durch eine Verschiebung der Anlagenkennlinie. Für die Auslegung der Förderanlagen bedeutet das eine hohe Bandbreite an Betriebspunkten, die abgedeckt werden müssen. Erfreulicherweise erfüllen das die Bestandsanlagen mit entsprechenden Reserven, wie in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt ist.

Für die detaillierte Bewertung der hydraulischen Kapazität der Gewinnungsanlagen bei Niedrigwasser ist die höchste Fördermenge und Absenkung in den Brunnenschächten entscheidend. In Abbildung 5 ist das Verhalten des Wasserstandes bei der Gewinnung von Uferfiltrat in einem Brunnen, linksrheinisch auf der Halbinsel Zonser Grind, in Abhängigkeit von der Fördermenge dargestellt. Mit steigender Förder-

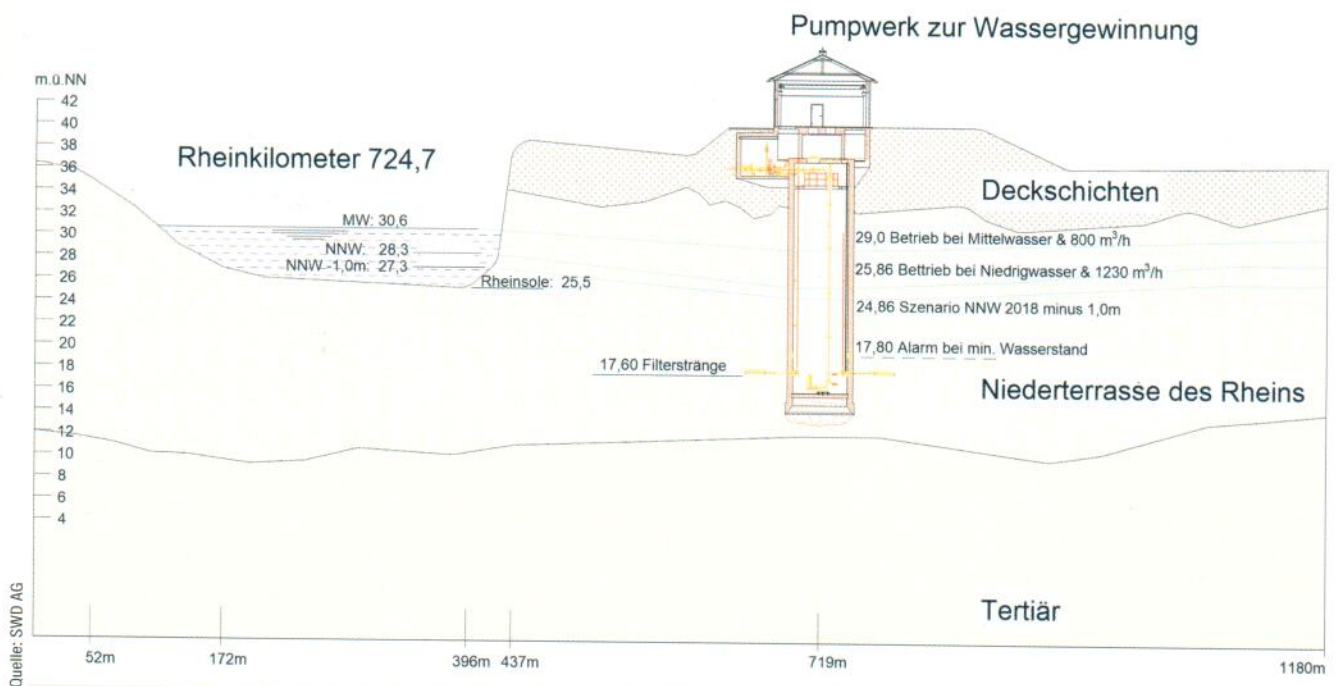


Abb. 3: Schnitt durch ein Pumpwerk und den Rhein bei verschiedenen Wasserstandsszenarien

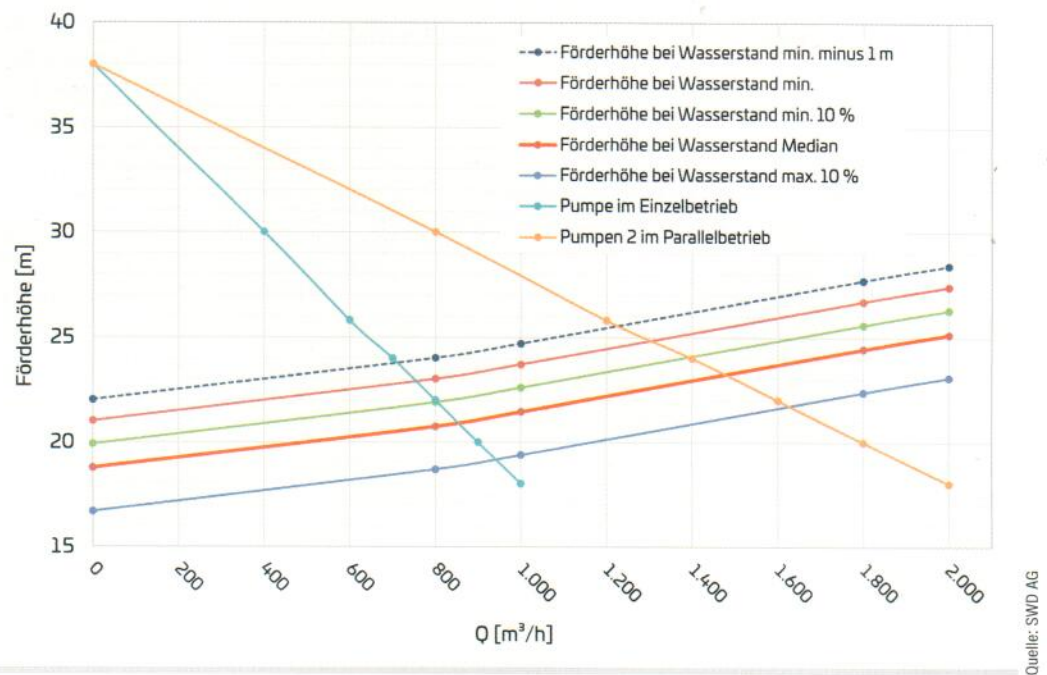


Abb. 4: Pumpenkennlinien und Förderhöhen-Pumpwerk

menge ergeben sich tiefere Absenkungen innerhalb des Brunnens. Die Werte aus 2018 zeigen die betriebliche Realität bei den bisher niedrigsten Wasserständen im Rhein. Darauf aufbauend wurde die Extrembetrachtung „NNW-Projektion minus 1,0 m“ ermittelt. Alle Parameter weisen einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu den betriebsnotwendigen Mindestwasserständen auf.

Diese Situation trifft im Wesentlichen auf alle Gewinnungsanlagen in den Wasserwerken zu. Bedingt durch die konservative Auslegung der Brunnenanlagen und hierbei insbesondere der

tiefen Lage der Horizontal-/Filterstränge, wird auch bei extremem Niedrigwasser die Wasserrförderung sichergestellt. Eine weitere Voraussetzung ist die ausreichend dimensionierte Leistungsfähigkeit der Pumpenanlagen in den Brunnen-schächten.

Ermittlung und Bewertung der technischen Leistungsfähigkeit

Der Ruhewasserspiegel der untersuchten Pumpwerke (Brunnen mit technischer Ausstattung) in Rheinnähe korrespondiert sehr eng mit dem

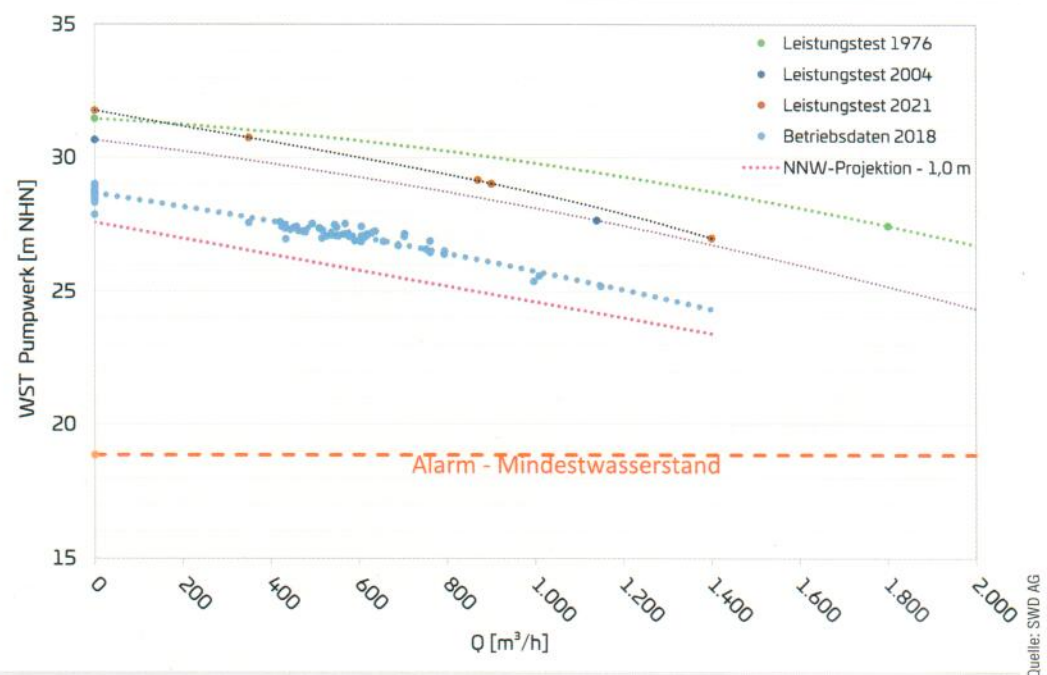


Abb. 5: Hydraulische Leistungsfähigkeit - Q/S-Diagramm Pumpwerk

Rheinwasserstand, sodass die statistische Auswertung des Rheinwasserstandes, übertragen auf die entsprechende Lage des Pumpwerkes, für den Ausgangswasserstand zur Ermittlung der Anlagenkennlinie herangezogen werden konnte.

Für die Quantile 0, 10, 50 und 90 Prozent des Ausgangswasserstandes sowie für das Szenario „NNW 2018 minus 1,0 m“ wurde eine Schar von Anlagenkennlinien berechnet. Die hydraulischen Verluste in den Leitungen sind aufgrund der weitgehend geringen Fließgeschwindigkeiten zwar wenig relevant. Die Absenkung im Brunnen aufgrund der Förderung stellt aber eine weitere relevante dynamische Einflussgröße auf den Verlauf der Anlagenkennlinie dar.

Für die Bewertung der technischen Leistungsfähigkeit der Pumpwerke wurde diese Schar von Anlagenkennlinien mit den Pumpenkennlinien für den Einzel- und Parallelbetrieb überlagert. Die Schnittpunkte stellen dann die real möglichen Betriebspunkte dar. Es wurden jeweils die 50-Hertz-Kenn-

linien verwendet und damit die maximale Leistungsfähigkeit der Pumpen betrachtet. Exemplarisch wird in Abbildung 4 die grafische Auswertung der technischen Leistungsfähigkeit für ein Pumpwerk dargestellt.

Für jede Wasserstandssituation wurden die Betriebspunkte tabellarisch zusammengestellt und die Summe der verfügbaren Gewinnungskapazität separat für die Gewinnungsstandorte gebildet. Durch die Summenbildung über alle Standorte hinweg und unter Berücksichtigung von Ausfallszenarien konnte eine transparente Darstellung der verfügbaren Gewinnungskapazitäten angefertigt werden. Die Betrachtung der Niedrigwassersituation 2018 und das Szenario „NNW 2018 minus 1,0 m“ belegen die bestehende Resilienz der Gewinnungsanlagen. Die gewinnbare Rohwassermenge deckt sicher den zu erwartenden Bedarf ab und korrespondiert mit der verfügbaren Aufbereitungskapazität der Wasserwerke. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die prognostizierten Kapazitäten für das Szenario „NNW 2018 minus 1,0 m“ eine gewisse ▶

Tabelle 1: Kapazität der Wassergewinnung bei Niedrigwasser

	Standort 1	Standort 2	Standort 3	Summe	
Niedrigwasser 2018	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /d
volle Verfügbarkeit für SWD AG*	2.420	5.070	8.550	16.040	384.960
Ausfall ein Pumpwerk je Standort	1.870	3.270	6.750	11.890	285.360
Niedrigwasser 2018 minus 1 m	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /d
volle Verfügbarkeit für SWD AG*	2.080	4.780	7.850	14.710	353.040
Ausfall ein Pumpwerk je Standort	1.430	3.080	6.250	10.760	258.240
Max. Bedarf entsprechend der abgesicherten Aufbereitungskapazität					256.800

Quelle: SWD AG

* Da es sich bei Standort 3 um ein Gemeinschaftswasserwerk handelt, wurde der Anteil der Lieferverpflichtung abgezogen.

Mit Edelstahl perfekt ausgerüstet und dauerhaft sicher!

Schächte sind erforderlich, um in Bauwerke für die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung einsteigen zu können.

Wir liefern Bauteile aus Edelstahl, die Schächte dauerhaft sicher machen.

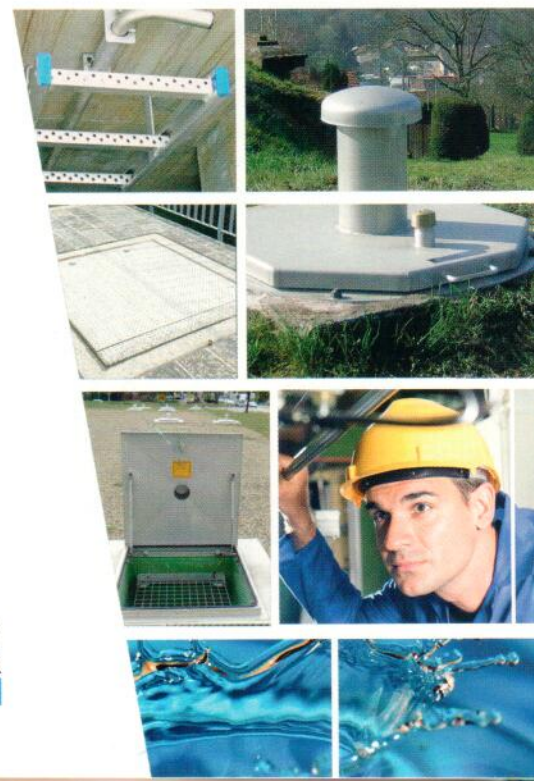
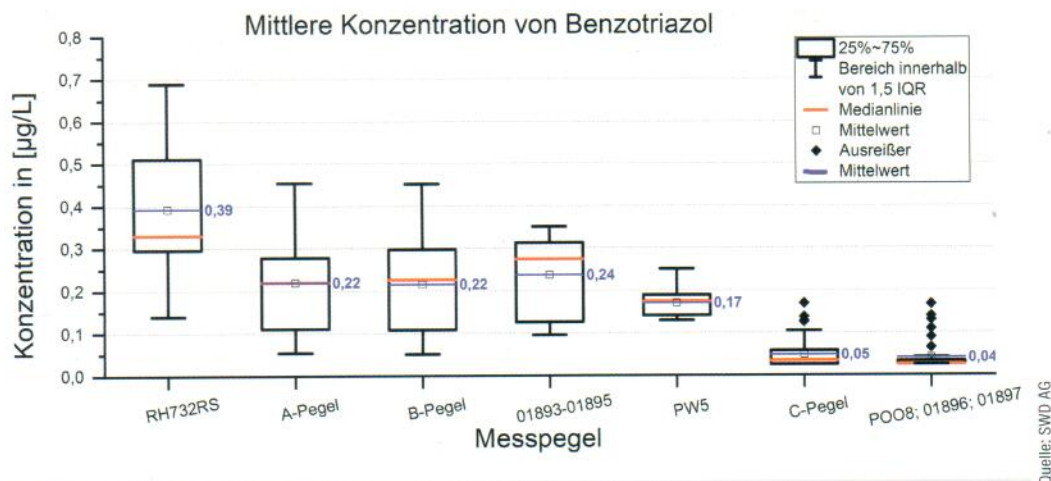


Abb. 6: Mittlere Benzotriazol-Konzentrationen im Rhein, Grundwassermessstellen und Pumpwerk PW 5 im WW Flehe. Von links nach rechts: Zunahme der Entfernung von der Rheinsohle, Verlängerung der Uferfiltrationsstrecke, 2018



Unsicherheit enthalten und sich tendenziell etwas niedriger darstellen werden; eine Abwertung um 10 Prozent scheint vor diesem Hintergrund sinnvoll.

Für die ungünstigste Situation bei einem hohen Ausfallgeschehen stehen dann immer noch 230.000 m³/d an Gewinnungskapazität zur Verfügung, was den maximal zu erwartenden Bedarf von 220.000 m³/d sicher abdeckt.

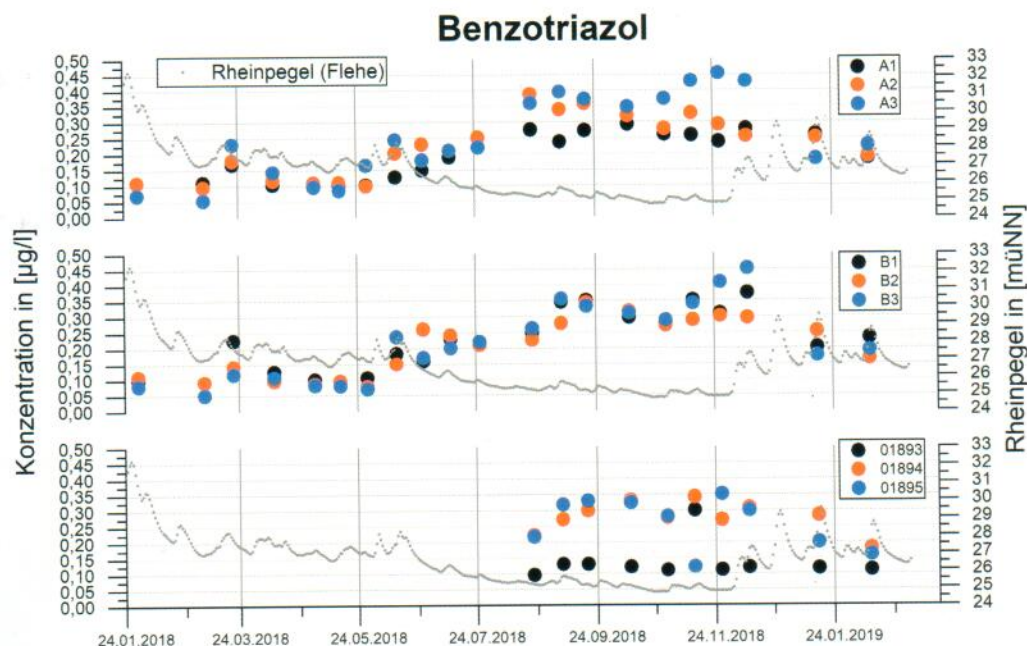
Weitere Risiken liegen in dem Rohwassernetz zwischen den Gewinnungs- und Aufbereitungsanlagen. Diese sollten in den nächsten Jahren überprüft und bewertet werden. In den Sommermonaten sollten die Anlagen möglichst voll zur Verfügung stehen, um störungsbedingte Ausfälle abdecken zu können.

Hydrochemische Betrachtung

Neben der Betrachtung der hydraulischen und technischen Leistungsfähigkeit der Wassergewinnungsanlagen darf die Komponente der Qualität nicht außer Acht gelassen werden. Wie beschrieben sehen sich Wasserversorger zukünftig aufgrund sinkender Grundwasser- und Flusspegelstände mit der Herausforderung konfrontiert, die Trinkwasserversorgung sicherzustellen. Insbesondere für Versorger, die Trinkwasser aus Uferfiltrat aufbereiten, ergibt sich eine weitere Schwierigkeit.

Die saisonalen Schwankungen der Einflussgrößen für die Uferfiltration zeigen relativ konstante Jahresgänge. Komplexe biologische und hydrochemische Prozesse führen je nach vorherrschendem Redox-Milieu zu einer deutlichen Reduzie-

Abb. 7: Konzentrationsentwicklung von Benzotriazol, dargestellt gegen den Rheinwasserstand im Jahr 2018



zung von mikrobiologischer Aktivität und gelösten Wasserinhaltsstoffen im Zuge der Uferfiltration. Die **Abbildung 6** zeigt diesen Effekt am Beispiel des weit verbreiteten Korrosionsschutzmittel Benzotriazol.

Die mittleren Benzotriazol-Konzentrationen sind im Rhein am höchsten, die übrigen Messstellen und das Pumpwerk zeigen mit längerer Verweilzeit (Untergrundpassage) niedrigere mittlere Konzentrationen. Durch die Untergrundpassage werden Spitzen in Konzentrationen von persistenten Stoffen abgepuffert und erst zeitlich verzögert dem Rohwasser mitgeteilt. Dieser genannte Konzentrationsrückgang ist grundsätzlich entkoppelt vom Wasserstand zu sehen.

Wenn der mittlere Abfluss aber deutlich zurückgeht, ist bei gleichbleibender Fracht der beschriebene Mechanismus so nicht mehr ausreichend wirksam. Dies gilt insbesondere für persistente Spurenstoffe. Die entsprechende Auswirkung ist **Abbildung 7** zu entnehmen, in der die Konzentrationsentwicklung von Benzotriazol im Jahr 2018 in rhein-nahen Grundwassermessstellen aufgeführt ist. Ebenfalls dargestellt ist der Rheinwasserstand. Mit sinkendem Rheinpegel ab Juni 2018 steigen die Konzentrationen von Benzotriazol deutlich an und erreichen Ende Oktober maximale Konzentrationen von ca. 0,45 Mikrogramm pro Liter ($\mu\text{g/l}$).

Die Wasseraufbereitung in Düsseldorf mit ihrer Kombination aus Ozon und Aktivkohle als letzter Schritt im Multi-barrieren-System ist gegen solche Konzentrationsanstiege ohne Weiteres gewappnet. Trotzdem könnte vor diesem Hintergrund ein sinnvoller Weg darin bestehen, (industrielle) Einleitmengen zukünftig an den Wasserstand in der Vorflut zu koppeln. Im Fall von extremen Niedrigwasserphasen wäre die Einschränkung von Einleitmengen ein wesentlicher Baustein für eine sichere Trinkwasserversorgung der Zukunft.

Zusammenfassung und Diskussion

Ausgehend von den im Jahr 2018 beobachteten Niedrigwasserverhältnissen im

Rhein und der dadurch reduzierten Leistungsfähigkeit der Gewinnungsanlagen wurde eine systematische Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Düsseldorfer Wassergewinnung bei Niedrigwasser bezüglich Menge und Qualität durchgeführt. Dabei wurden die verfügbaren Klimaprognosen und deren Auswirkungen auf das Abflussregime des Rheins analysiert. Für den Rhein als Hauptquelle für die Uferfiltratgewinnung werden darin sinkende Niedrigwasserabflüsse prognostiziert. Daraus resultierend wurde ein Szenario von einem Meter niedrigerem Wasserstand als der bisherige Niedrigwasserstand von 2018 für die Betrachtung angesetzt.

Die Tiefenlage der Filterstränge der Horizontalfilterbrunnen sowie die gute Durchlässigkeit des Untergrundes und damit die gute hydraulische Anbindung an den Rhein ermöglichen die sichere Wassergewinnung auch bei dem betrachteten extremen Szenario.

Die Analyse der Leistungsfähigkeit hat sowohl aus hydraulischer als auch aus technischer Sicht eine zufriedenstellende Leistungsfähigkeit der Gewinnungsanlagen auch bei Niedrigstwasser ergeben. Unter Berücksichtigung von realistischen bis sicherheitsorientierten Ausfallszenarien von Teilanlagen ist der maximale Bedarf der Wasserversorgung Düsseldorfs abgedeckt. Die Anlagen sollten aber in den Sommermonaten voll verfügbar sein und in ihrer Leistungsfähigkeit erhalten bleiben, um dies auch in Zukunft gewährleisten zu können. Die Absicherung der entsprechenden Wasserrechte und Schutzzonen dient ebenfalls diesem Zweck und sollte den erforderlichen Stellenwert behalten. Gegenüber der „Normalleistungsfähigkeit“ bei Mittelwasserstand ist diese bei Niedrigwasser (2018) um 13 Prozent reduziert und bei dem Szenario „minus 1 m“ um 20 Prozent.

Bezüglich der Untersuchung und Bewertung der hydrochemischen Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen konnte ein signifikanter Konzentrationsanstieg im Rheinwasser festgestellt werden. Bei gleicher Fracht aus den Einleitungen erhöht sich die Konzentration propor-

tional zur Abnahme des Abflusses im Rhein. Für einige Stoffe ergeben sich daraus deutliche und zum Teil problematische Konzentrationsanstiege. Für die Genehmigung der Einleitungen in den Rhein sollte dieser Sachverhalt berücksichtigt werden, um die zu beobachtenden Konzentrationsspitzen besonders an persistenten Stoffen zu vermeiden. Auch wenn die Uferfiltration vergleichmäßigend wirkt und die Wasseraufbereitung die Stoffe weitgehend reduziert, soll die Ressource Rhein entsprechend geschützt werden. ■

Literatur

[1] IWW Zentrum Wasser: Entwicklung eines regionalen Risikomanagements für eine klimarobuste Wasserversorgung in der Niederrheinregion, Mülheim 2014.

Die Autoren

Dr. Björn Droste ist Hydrogeochemiker bei den Stadtwerken Düsseldorf AG und verantwortet die wasserchemische Analytik und die wasserwirtschaftlichen Aufgaben und Tätigkeiten innerhalb der Qualitätsüberwachung der Wasserwerke.

Stefan Kamphausen ist Umweltingenieur beim Betrieb Wasserwerke bei den Stadtwerken Düsseldorf AG und ist für die betriebliche Optimierung, die Grundlagenermittlung und das Energiemanagement verantwortlich.

Pegah Kamkar ist Ingenieurin für Siedlungswasserwirtschaft bei den Stadtwerken Düsseldorf AG und verantwortet die wasserwirtschaftlichen Aufgaben bei den Wasserwerken.

Kontakt:

Dr. Björn Droste
Stadtwerke Düsseldorf AG
Wiedfeld 50
40589 Düsseldorf
Tel.: 0211 821-4077
E-Mail: bdroste@swd-ag.de
Internet: www.swd-ag.de