

Langzeitbewirtschaftungsanalyse für das Talsperrensystem im Einzugsgebiet der Ruhr

Gerd Morgenschweis, Georg zur Strassen (Ruhrverband Essen),
Dirk Schwanenberg (WL | Delft Hydraulics)

10 Langzeitbewirtschaftungsanalyse für das Talsperrensystem im Einzugsgebiet der Ruhr

Neben wasserwirtschaftlichen Betriebsplänen für die kurz- und mittelfristige Betriebsweise fordert die im Juli 2004 erschienene DIN 19700 von Talsperrenbetreibern die Aufstellung von Speicherbewirtschaftungsplänen für den langfristigen Normalbetrieb. Diese dienen dem Nachweis der Speicherleistung in Abhängigkeit von der Nutzungsart. Im Zusammenhang mit dem Speichersystem im Einzugsgebiet der Ruhr geht es dabei um die zentrale Frage:

Reichen die vorhandenen Talsperrenkapazitäten für eine langfristig sichere Wasserversorgung aus oder gibt es Freiräume zur Befriedigung weiterer Nutzungsansprüche an das vorhandene System, wie z. B. eine mögliche Erweiterung der Hochwasserschutzräume?

Zur Beantwortung dieser Frage wurden von WL | Delft Hydraulics im Auftrag des Ruhrverbands Langzeitsimulationsrechnungen mit Hilfe von stochastisch erzeugten langen Zeitreihen (10 x 1.000 Jahre) auf Tagesbasis durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen hiermit der Fachöffentlichkeit vorgestellt werden.

10.1 Veranlassung

Im Laufe der letzten Jahre wurden Modelle zur Echtzeitbewirtschaftung des Talsperrensystems im Einzugsgebiet der Ruhr bei Hoch- und Niedrigwasser entwickelt und in der Leitzentrale in Essen implementiert. Mit Hilfe dieser „Werkzeuge“ ist es möglich, die Abgaben aus den Talsperren kurzfristig an die jeweilige aktuelle Situation im Einzugsgebiet anzupassen und so die gesetzlich vorgegebenen Mindestabflüsse jederzeit einzuhalten. Das Programmsystem hat sich sowohl im Niedrigwasser- als auch im Hochwasserbereich in der Praxis als Entscheidungshilfe bewährt.

Zur Sicherstellung des langfristigen Betriebs von Talsperren werden darüber hinaus vom Betreiber Nachweise über die Speicherleistung verlangt. So fordert die im Juli 2004 erschienene DIN 19700 in Teil 11 die Aufstellung von Speicherbewirtschaftungsplänen. Hierzu sind „Simulations- bzw. Optimierungsrechnungen unter Beachtung konkurrierender Nutzungen und ergänzender Anforderungen zu führen und durch Angaben von Sicherheiten zu belegen“ (DIN 19700, 2004). Um zuverlässige Aussagen zu ermöglichen, werden Langfristsimulationen mit stochastischen Modellen über 1.000 und mehr Jahre empfohlen.

Zusätzlich werden Kenntnisse über die Grenzleistungsfähigkeit der Speicher unter bestehenden und unter für Planungszwecke veränderten Randbedingungen benötigt, um die Versorgungssicherheit des Speichersystems zu überprüfen. Veränderte Randbedingungen können z. B. die Erweiterung der Hochwasserschutzräume, die Einführung neuer Grenzwerte der Wasserführung sowie ökologisch orientierte veränderte Abgaberegeln sein. Langfrist-Simulationsmodelle ermöglichen es, die Auswirkungen solcher Änderungen

auf die Leistungsfähigkeit bzw. die Grenze der Leistungsfähigkeit des Systems zu ermitteln und damit die Machbarkeit von Nutzungsänderungen zu bewerten.

Ein entsprechendes Modell wurde erstmalig in den 1970er Jahren vom Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. U. Maniak für die Ruhrtalsperren entwickelt und für Planungen vielfältig eingesetzt.

Die Randbedingungen für eine solche Langzeituntersuchung haben sich jedoch sowohl bezüglich der heute zur Verfügung stehenden Messdaten, der Weiterentwicklung wissenschaftlicher Verfahren als auch durch geänderte Anforderungen und veränderte Bedarfsstrukturen im Versorgungsgebiet so gewandelt, dass die Neuaufstellung eines Modells zur Langfristsimulation des Talsperrensystems notwendig wurde, um auch zukünftig angemessene Antworten auf neue Anforderungen an das Talsperrensystem geben zu können.

Grundsätzlich liegt das Hauptproblem der Langzeitsimulation eines Talsperrensystems in der Bereitstellung geeigneter Eingangsdaten. Da die Zeiträume, in denen historische Messdaten vorliegen, für statistische Aussagen im Allgemeinen nicht ausreichend lang sind, müssen für die Simulationsrechnungen künstlich generierte Daten eingesetzt werden. Dabei werden Zuflussdaten zu den Talsperren und Abflussdaten in den Gewässern z. B. mit Hilfe stochastischer Verfahren (Markow-Modelle 1. Ordnung) in statistisch ausreichender Länge (z. B. für 1.000 oder mehr Jahre) generiert und als Eingangsdaten für Simulationsmodelle zur Verfügung gestellt (Fiering, 1967). Mit der Rekursionsgleichung von Fiering lassen sich Monatswerte des Zuflusses problemlos simulieren. Diese Vorgehensweise funktioniert jedoch nicht, wenn Tageswerte des Abflusses erzeugt werden sollen, da dann zu hohe Interkorrelationen zwischen den Einzelwerten auftreten können. Andererseits erfordert das Ruhrtalsperrensystem Tageswerte als Zeitschritt, um seine Sicherheit realitätsnah abbilden zu können, da die Grenzwerte an den Kontrollquerschnitten auch auf Tageswerten basieren. Eine Betrachtung auf Monatsbasis erzeugt einen zu niedrigen Zuschussbedarf und würde damit die Talsperrenkapazität überschätzen.

Um eine Lösung dieses Problems zu finden, wurden im Laufe des Jahres 2003 Fachgespräche mit einer Reihe national und international renommierter Forschungsinstitute und Ingenieurbüros geführt. Nach detaillierter Überprüfung der vorgelegten Lösungsvorschläge und der zugehörigen Angebote wurde die Fa. WL | Delft Hydraulics beauftragt. WL | Delft Hydraulics ist ein niederländisches Forschungsinstitut in Delft mit ca. 350 Mitarbeitern, das sehr erfolgreich angewandte Forschung und Consulting im Bereich Wasser betreibt und u. a. wasserwirtschaftliche Modelle/Software entwickelt. Für das Angebot von Delft Hydraulics sprach der vorgestellte methodische Ansatz, der die beim Ruhrverband vorhandenen und bewährten hydrologischen Modelle vollständig integriert.

So wurde im Juli 2004 WL | Delft Hydraulics (Abt. Hydrologie: Dr. D. Schwanenberg und Dr. M. Werner) damit beauftragt,

1. eine Software für die Langfristsimulation des Ruhralsperrensystems zu erstellen und
2. Langfristbewirtschaftungsanalysen bei verschiedenen vorgegebenen Szenarien durchzuführen.

Teil 1 beinhaltet auch eine Schulung in die eigenständige Nutzung des Modellsystems.

10.2 Langzeitsimulation von Talsperren auf Tagesbasis

10.2.1 Konzept

Um die Problematik der statistischen Interkorrelationen bei der stochastischen Generierung langer Durchflusszeitreihen auf Tagesbasis zu vermeiden, bietet sich die Verwendung von Indexgrößen wie z. B. Niederschlag, Großwetterlage an, mit denen über nachgeschaltete Niederschlag-Abfluss- und Wellenfortpflanzungsmodelle die gesuchte Größe „Durchfluss“ abgeleitet werden kann. So werden bei der hier vorgestellten Untersuchung mit stochastischen Modellen erzeugte lange Reihen (10 x 1.000 Jahre) von Tageswerten des Niederschlags und der Lufttemperatur als Eingangsdaten für das Wasserhaushaltsmodell PRMS und das Bewirtschaftungsmodell RRM, die bereits im Rahmen der Kurzfristmodellierung im operativen Einsatz sind, verwendet.

Als Plattform für die Durchführung der Analyse kommt die Software Delft-FEWS (Flood Early Warning-System) zum Einsatz. Sie wurde von Delft Hydraulics ursprünglich für den operationellen Betrieb von Hochwasserfrühwarnsystemen entwickelt. Aufgrund ihrer effizienten und robusten Kopplung beliebiger Daten und Modelle findet sie darüber hinaus auch in anderen Bereichen eine immer breiter werdende Anwendung.

Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden Anpassungen und Ergänzungen an der Software vorgenommen:

- Integration der beim Ruhrverband verwendeten Modelle PRMS und RRM in Delft-FEWS über die offene Schnittstelle des Modelladapters durch das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), vormals: Institut für Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe
- Erstellung des Talsperrenbewirtschaftungsmoduls
- Administration von Langfristanalysen (mit der neu entwickelten FEWS-Funktion „Batch-Vorhersage“)
- Erstellung eines Moduls zur Ereignisanalyse und Visualisierung auf der Basis von definierten Parametern

10.2.2 Erzeugung synthetischer Zeitreihen auf Tagesbasis

Ermittlung der erforderlichen Eingangsdaten

Die für die Langfristanalyse benötigten synthetischen Zeitreihen von Tageswerten des Niederschlags, der Lufttemperatur und der potentiellen Verdunstung wurden mit Hilfe des Rainfall-Generator des Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) erstellt. Der speziell für das Rheineinzugsgebiet entwickelte Generator erlaubt die Erstellung von langjährigen synthetischen Zeitreihen mit einer Zeitschrittweite von einem Tag. Die synthetischen Reihen wurden auf der Basis von gemessenen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Ruhrverbands aus dem Beobachtungszeitraum 1961–1995 erstellt und weisen mit diesen Daten weitgehend identische statistische Charakteristika auf.

Da der Generator schon mehrfach im Rheineinzugsgebiet angewendet wurde, lagen auch für das Ruhreinzugsgebiet synthetische Zeitreihen vor. Für frühere Untersuchungen wurde das Ruhreinzugsgebiet in vier Teileinzugsgebiete aufgeteilt, für die jeweils Niederschlags- und Temperaturzeitreihen über eine Periode von 10 x 1.000 Jahren in einem Zeitschritt von einem Tag vorlagen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die bestehenden Indexzeitreihen der vorherigen Studien genutzt und zur Erzeugung von synthetischen Zeitreihen auf der Basis der regionalen Wetterstationen des Ruhreinzugsgebiets verwendet. Da die Indexzeitreihen mit dem Ziel der Hochwasser- und nicht der Niedrigwasseranalyse erstellt worden waren, wurde vor Gebrauch der Daten eine statistische Analyse durchgeführt, inwieweit die vorhandenen Zeitreihen eine ausreichende Variabilität zur ausreichend guten Abbildung des Niedrigwasserbereiches aufweisen.

Erzeugung von Niederschlagszeitreihen

Für die Ableitung der Niederschlagszeitreihen wurde auf alle vorhandenen Daten des Ruhrverbands im Ruhreinzugsgebiet zurückgegriffen, für die Werte im Beobachtungszeitraum von 1961–1995 vorhanden waren. Über eine Interpolationsroutine wurden die Niederschläge in einem ersten Schritt auf die 51 Teileinzugsgebiete des PRMS-Modells umgerechnet. Die Zeitreihen wurden danach auf der Basis der im Rainfall-Generator generierten Indizes umsortiert, so dass eine synthetische Zeitreihe für einen Zeitraum von 1.000 Jahren für jedes Teileinzugsgebiet entsteht.

Der Niederschlagsgenerator verwendet zur Erzeugung der Indizes eine komplexe Nearest Neighbour Resampling-Technik. Diese Methode wurde auf die Erhaltung der wichtigsten statistischen Eigenschaften der Originalzeitreihen in den synthetischen Reihen abgestimmt. Diese beinhalten das lokale Klima (Mittelwerte, Variabilität, Jahresgang etc.), die Standardabweichung täglicher und monatlicher Werte, die Abfolge trockener und feuchter Perioden sowie die Niederschlagsmaxima über verschiedene Integrationsperioden.

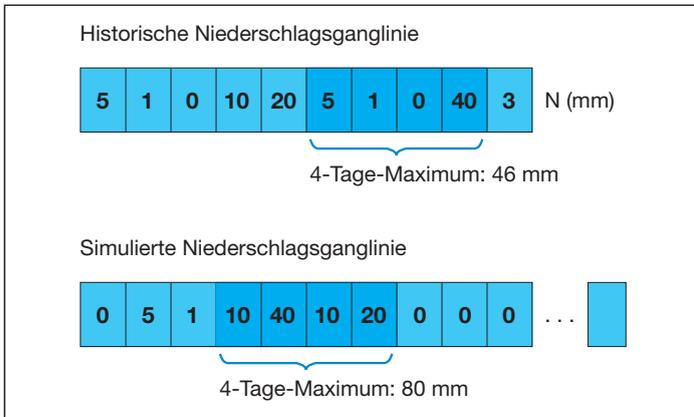


Bild 24: Prinzip der Methode „Nearest Neighbour Resampling“ zur Erzeugung von synthetischen Niederschlagsreihen
 Fig. 24: Method of „nearest neighbour resampling“ used to generate synthetic time series for rainfall

In Bild 24 ist der Prozess des Resamplings vereinfacht dargestellt. Es wird deutlich, dass bei einem Resampling auf der Basis von Tageswerten keine neuen Minima oder Maxima der Tageswerte selbst erzeugt werden können. Für Integrationsperioden von zwei Tagen und mehr entstehen jedoch, sofern die generierte synthetische Zeitreihe lang genug ist, neue Extremwerte der Niederschlagssummen.

Aus der Anwendung des „Rainfall-Generator“ für das Rheineinzugsgebiet sind zehn Indexreihen vorhanden, mit denen jeweils eine Umsortierung einer Zeitreihe aus dem Zeitraum 1961–1995 in eine 1.000-jährige synthetische Zeitreihe durchgeführt werden kann. Es stehen somit insgesamt 10.000 Jahre synthetischer Daten auf Tagesbasis für die Langzeitanalyse des Ruhrsystems zur Verfügung.

Zur Analyse der synthetischen Zeitreihen wurden Niederschlagssummen getrennt für das Sommer- und Winterhalbjahr sowie einen Zeitraum von zwei und fünf Jahren berechnet und mit den entsprechenden Summen der historischen Zeitreihen verglichen. Im nachfolgenden Bild 25 sind die Niederschlagssummen der Größe nach sortiert und als Funktion ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit unter Annahme einer Standardnormalverteilung dargestellt.

In Bild 25 a sind die über das Ruhreinzugsgebiet gemittelten Niederschlagssummen im Sommerhalbjahr (1. Mai – 31. Oktober) für die historischen Daten im Zeitraum von 1961–1995 und die zehn erzeugten synthetischen Zeitreihen von 1.000 Jahren dargestellt (Ran 1.1 – Ran 1.10). Insgesamt kann eine gute Übereinstimmung zwischen den historischen und synthetischen Daten festgestellt werden. Bei mittelnassen Sommerhalbjahren fällt auf, dass bei Ereignissen einer gleichen Eintrittswahrscheinlichkeit die Niederschlagssummen in den synthetischen Ganglinien leicht unterschätzt werden. Ein entgegengesetztes Bild ergibt sich bei den mitteltrockenen Sommern, in denen der Niederschlag in den synthetischen Zeitreihen leicht überschätzt wird. Im Hinblick auf die Extremwerte der synthetischen Reihen ergeben sich sowohl bei sehr trockenen als auch sehr nassen Sommern Niederschlagssummen, die wesentlich extremer als die gemessenen Summen sind. Insbesondere in diesen Extrembereichen zeigen sich die größten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Indexreihen des Regengenerators. In Bild 25 b sind die über das Ruhreinzugsgebiet gemittelten Niederschlagstagesummen im Winterhalbjahr (1. November – 30. April) für die historischen Daten im Zeitraum von 1961–1995 und die zehn erzeugten synthetischen Zeitreihen von 1.000 Jahren dargestellt. In den nassen Winterhalbjahren kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den historischen Daten und den synthetischen

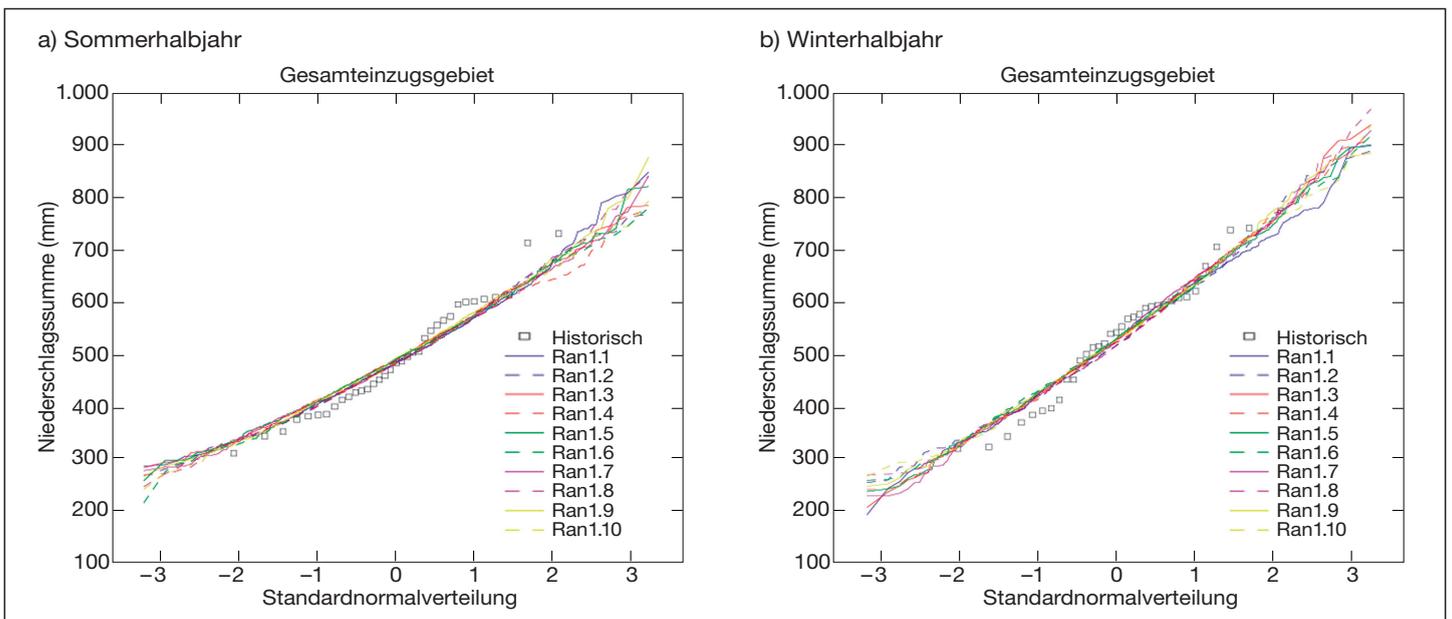


Bild 25: Niederschlagssummenlinien des
 a) Sommerhalbjahres und b) Winterhalbjahres
 als Funktion der Auftretenswahrscheinlichkeit für die historischen
 Daten im Zeitraum von 1961–1995 und die 10 synthetischen
 Zeitreihen von je 1.000 Jahren

Fig. 25: Precipitation sums of an integrated period consisting of
 a) a summer half-year and
 b) a winter half-year
 for historical and synthetic data

Zeitreihen festgestellt werden. Bei den trockenen Wintern wird der Niederschlag in den synthetischen Zeitreihen jedoch leicht überschätzt. Im Hinblick auf die Extremwerte der synthetischen Reihen können jedoch sowohl bei sehr trockenen als auch sehr nassen Wintern analog zu den Niederschlagssummen des Sommers Werte beobachtet werden, die wesentlich extremer als die gemessenen Summen sind. Bei einer räumlich differenzierten Betrachtung der Niederschlagssummen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Teileinzugsgebieten festgestellt werden.

In Bild 26a sind die über das Ruhreinzugsgebiet gemittelten Niederschlagssummen über einen Zeitraum von zwei Jahren für die historischen Daten und die 10 erzeugten synthetischen Zeitreihen dargestellt. Die Auswertung wurde pro Jahr durchgeführt, so dass die Niederschlagssumme eines Sommers oder Winters jeweils zweimal in den Analyseergebnissen auftritt. Für diese längere Integrationsperiode fällt auf, dass im Trockenbereich Niederschlagssummen in den synthetischen Reihen auftreten, die in einzelnen Reihen höher sind, als die in den historischen Reihen beobachteten Werte. Es lässt sich somit vermuten, dass in der Realität langjährige Persistenzeffekte im Wettergeschehen eine Rolle spielen, die vom Niederschlagsgenerator nicht abgebildet werden, d. h. dass eine erhöhte Chance zu bestehen scheint, dass ein trockenes Jahr auf ein vorheriges trockenes Jahr folgt. Das Fehlen dieses Effektes in den synthetischen Reihen erscheint insbesondere im Hinblick auf die Langfristanalyse problematisch, da damit die Kapazitätsreserven des Talsperrensensystems in der Analyse überschätzt werden.

Zur weiteren Analyse der langfristigen Persistenzeffekte wird ein Verfahren auf der Grundlage von Hurst (1951) angewendet, das

ursprünglich für die Analyse der Abflusszeitreihe des Nils im Rahmen des Baus des Assuandamms entwickelt wurde. Als ein Maß für die Persistenz in einer Zeitreihe kann mit diesem Verfahren der so genannte Hurst-Faktor k berechnet werden. Dieser Faktor liegt nach Aussage von Hurst für natürliche Zeitreihen bei etwa 0,7 – während er für zufällig verteilte Zeitreihen 0,5 ist.

Für das Ruhreinzugsgebiet konnte die Persistenz in den historischen Niederschlags- und Abflussdaten relativ gut nachgewiesen werden. Der Faktor liegt für den Gebietsmittelwert des Niederschlags bei 0,703 und somit in der auch schon von Hurst festgestellten Größenordnung.

Die Analyse synthetischer Niederschlagsdaten zeigt jedoch, dass in diesen Zeitreihen praktisch keine oder nur eine sehr geringe Persistenz über die analysierte Zeiteinheit eines Halbjahres vorhanden ist. Die Analyse bestätigt somit die Auswertung der Niederschlagssummen über einen Zeitraum von zwei Jahren, in der die fehlende Persistenz in den synthetischen Zeitreihen dazu führt, dass die Minima und Maxima des Niederschlags im Gegensatz zu den historisch beobachteten Werten als zu wenig extrem erscheinen.

Daher war es notwendig, die synthetischen Daten hinsichtlich der in den historischen Daten beobachteten Persistenz zu korrigieren. Das Verfahren erzeugt im ersten Schritt eine Zeitreihe mit einer maximalen Persistenz durch die Sortierung der Daten gemäß ihrer Niederschlagssummen. Danach wird diese Ordnung wieder durch ein zufällig durchgeführtes Vertauschen von (nicht überlappenden) Segmenten der Zeitreihe mit einem bestimmten Zeitintervall teilweise wieder zerstört. Die Anzahl der Schritte zum Vertauschen

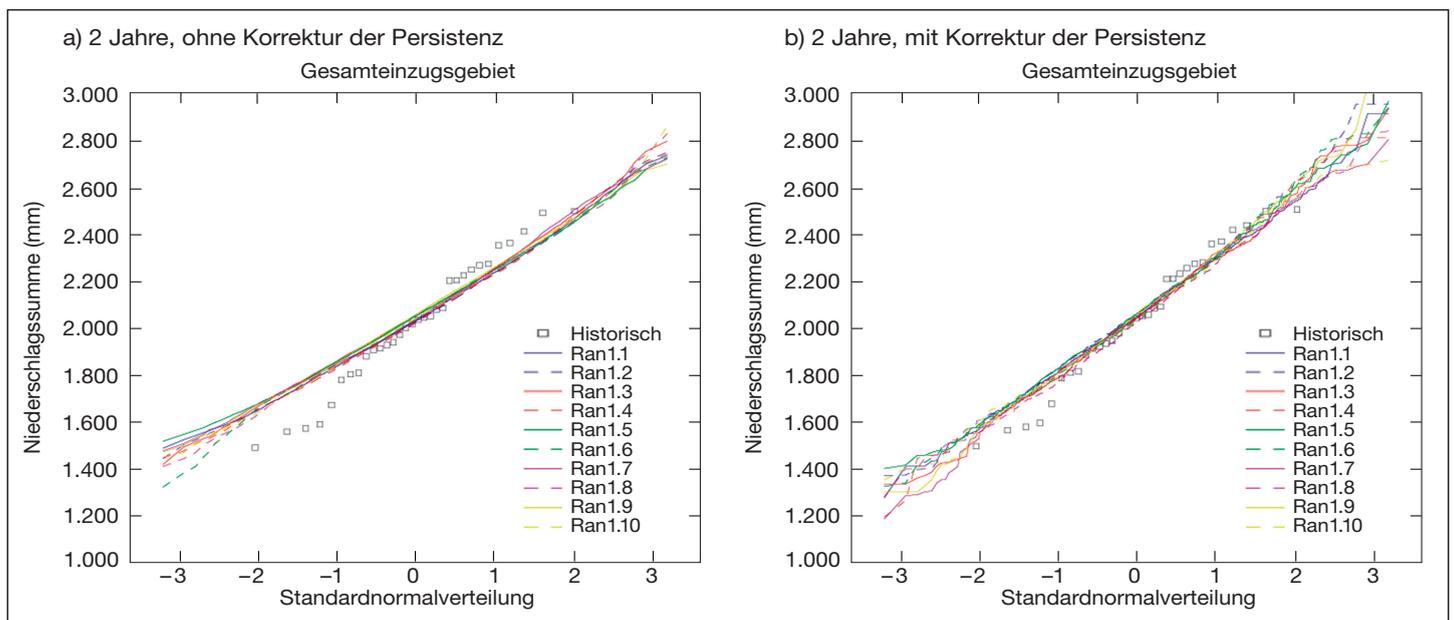


Bild 26: Niederschlagssummenlinien eines Zeitraumes von 2 Jahren als Funktion der Auftretenswahrscheinlichkeit
a) ohne Korrektur der Persistenz
b) mit Korrektur der Persistenz

Fig. 26: Precipitation sums of an integrated period of two years for historical and synthetic data
a) uncorrected and
b) corrected

der Zeitreihe und das Zeitintervall legt fest, wie viel Persistenz in der Zeitreihe erhalten bleibt. Die Schrittzahl wurde durch einen visuellen Vergleich der berechneten Niederschlagssummen mit den historischen Daten optimiert.

Das Ergebnis der Korrektur ist in Bild 26b im Vergleich zu den nicht korrigierten Zeitreihen aus dem Niederschlagsgenerator dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Übereinstimmung mit Hilfe der Korrektur deutlich verbessert werden konnte. Die in den synthetischen Reihen von 1.000 Jahren auftretenden Minima und Maxima sind jetzt erwartungsgemäß extremer als in den historischen Daten einer Periode von 35 Jahren.

Eine erneute Analyse des Hurst-Faktor zeigte, dass in den korrigierten synthetischen Zeitreihen nach der Korrektur eine höhere Persistenz nachzuweisen ist, die jedoch noch nicht an die Werte der historischen Reihe heranreicht.

Erzeugung von Zeitreihen der Lufttemperatur und der Luftfeuchte

Die Erzeugung der synthetischen Zeitreihen für die Lufttemperatur (Tagesmittel, Minimum, Maximum, Terminwert um 14:00 MEZ) und die Luftfeuchtigkeit (Terminwert um 14:00 MEZ) erfolgte analog zum Vorgehen bei der Erzeugung der Niederschlagsdaten. Ein Unterschied besteht lediglich in der Normierung der Daten. Für die Lufttemperatur wurde ein gemittelter Jahresgang auf der Basis der Tagesmittel erstellt und für die Normierung sowohl der Tagesmittel als auch der Minima, Maxima und des Terminwerts verwendet. Anders als beim Niederschlag wird der Jahresgang nicht dividiert bzw. multipliziert, sondern von der Zeitreihe subtrahiert bzw. addiert.

Die Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsdaten im Zeitraum 1961–1995 liegen ausschließlich für die zwei DWD-Stationen „Essen“ und „Kahler Asten“ vor. Eine räumliche Interpolation dieser Daten auf die Teileinzugsgebiete des hydrologischen Modells erfolgt mit Hilfe einer „Inverse Distance“-Interpolation. Für die Zeitreihen der Luftfeuchtigkeit findet keine Normierung statt.

Auf der Basis von Luftfeuchte, Lufttemperatur und weiteren Parametern wird eine Zeitreihe für die tägliche potentielle Verdunstung in den einzelnen Teileinzugsgebieten abgeleitet. Die Berechnung basiert auf dem für gemäßigte humide Klimagebiete geeigneten Haude-Verfahren zur Berechnung der potentiellen Verdunstung auf Tagesbasis (Haude, 1958).

10.2.3 Überprüfung der eingesetzten hydrologischen Modelle im Hinblick auf die Langzeitanalyse

Wie in Kapitel 10.1 erläutert, sollen die beim Ruhrverband für die Talsperrensteuerung im Rahmen von CARO (**C**omputer **A**ided **R**eservoir **O**peration) seit Jahren eingesetzten und in der Praxis bei der Simulation des komplexen wasserwirtschaftlichen Systems bewährten hydrologischen Modelle in die Langfristmodellierung integriert werden. Es handelt sich dabei zum einen um das Wasser-

haushaltsmodell PRMS (**P**recipitation **R**unoff **M**odel **S**ystem), das auf Tagesbasis Zuflussganglinien der Gewässer ohne Talsperreneinfluss liefert, und zum anderen um das Bewirtschaftungsmodell RRM (**R**ead-Time **R**iver **M**odel), das den Abfluss im gesamten Einzugsgebiet (d.h. für Teileinzugsgebiete mit und ohne Talsperreneinfluss) als eine Verknüpfung von Niederschlag-Abfluss-, Speicher- und Flood-Routing-Modellen nachbildet und so Vorhersagen ermöglicht.

Um die vorhandenen Modelle, die in der Praxis für Kurzzeitsimulationen im Echtzeitbetrieb verwendet werden, für Langzeitberechnungen einsetzen zu können, wurden von dem damaligen Modellentwickler, dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) der Universität Karlsruhe, Modelladapter entwickelt, die den Informationsaustausch zwischen Delft-FEWS und den verwendeten Modellen ermöglichen.

Die vorhandenen Modelle wurden einer Validierung unterworfen. Diese diente dem Test der korrekten technischen Kopplung der Modelle und der Überprüfung der Modellergebnisse im Hinblick auf die Langfristanalyse.

Wasserhaushaltsmodell PRMS

In der Analyse der synthetischen Niederschlagsganglinien konnte nachgewiesen werden, dass die synthetischen Niederschlagssummen im Mittel den Summen der vorhandenen historischen Daten entsprechen. Im Hinblick auf die Langfristanalyse des Ruhrtalsperrensystems war nun zu überprüfen, ob auch die durch PRMS durchgeführte Generierung von Abflussdaten aus diesem Niederschlag in ihrer langfristigen Volumenbilanz korrekt durchgeführt wird. Die Validierung wurde mit historischen Daten aus einem Zeitraum von 1961–1995 durchgeführt. Zur Analyse der Wasserbilanz wurden an ausgewählten Pegeln Volumenbilanzen durch eine Integration des Abflusses über die Zeit berechnet.

Es zeigte sich, dass die Volumina durch PRMS leicht überschätzt werden. Die Bandbreite dieser Überschätzung bewegt sich zwischen 1% (Pegel Bamenohl) und 15% (Pegel Eckesey). Eine Überschätzung des Wasserdargebots führt in der Langfristanalyse zu einer Überschätzung der Kapazitätsreserven des Talsperrensystems. Aus diesem Grund wurde eine Korrektur bzw. Abminderung der durch PRMS berechneten Abflüsse vorgenommen. Die Korrektur wird konstant für das gesamte Einzugsgebiet angesetzt und berechnet sich aus den mit der Einzugsgebietsgröße gewichteten Abweichungen der Teileinzugsgebiete Oeventrop, Hohenlimburg und Eckesey zu 8,35%. Der gerundete Wert von 8% wurde als Korrektur in die Langfristanalyse übernommen.

Talsperrenbewirtschaftung

Die Talsperrenbewirtschaftung durch den Ruhrverband basiert in der Praxis im Niedrigwasser- und Hochwasserbereich auf der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften und Auflagen von Plangenehmigungsbescheiden.

So existieren im Niedrigwasserbereich einerseits Mindestwasserabgaben für die Speicher, andererseits gesetzlich vorgeschriebene Mindestabflüsse an Kontrollpegeln in der Ruhr. Im Hochwasserbereich sind an drei Talsperren im Winter Hochwasserschutzräume freizuhalten.

Bei der Simulation des Ruhrsystems muss daher die Bewirtschaftung der Talsperren explizit mit berücksichtigt werden.

Die aktuell vorhandenen Bewirtschaftungsstrategien im gesamten Abflussspektrum wurden im Rahmen eines Workshops erhoben und im neu entwickelten Talsperrenbewirtschaftungsmodul von Delft-FEWS implementiert, um so Entscheidungen, die zur Festlegung des Abflusses aus den Speichern beitragen, nachzubilden.

Es handelt sich dabei um die folgenden Betriebsregeln:

1. eine Mindestwasserabgabe an den Talsperren,
2. eine Mindestwassermenge an den Bezugspegeln Oeventrop, Villigst und Hattingen (gilt vom Pegel Hattingen bis zur Ruhrmündung),
3. eine Bewirtschaftungsregel für Betriebszustände, in denen die Abgabe größer als die Mindestwasserabgabe und kleiner als die maximale Abgabe ist,
4. die Bereitstellung eines Hochwasserschutzraumes.

Bei der Bewirtschaftung wird von der vollen Verfügbarkeit aller Speicher über die gesamte Berechnungsperiode ausgegangen. Eine detaillierte Dokumentation des Talsperrenmanagementmoduls und die für das Ruhrtalsperrensystem implementierten Regeln befindet sich im Endbericht vom Januar 2006 (WL | Delft Hydraulics, 2006).

Ein Vergleich der gemessenen und simulierten Füllstände der Speicher basiert wiederum auf der Simulation der Periode 1961–1995. Die berechneten Talsperrenvolumina sind in Bild 27 am Beispiel der Biggetalsperre den vorhandenen Messungen gegenübergestellt.

Nach Analyse der historischen und simulierten Speicherinhalte fällt auf, dass diese bei Anwendung des Talsperrenbewirtschaftungsmoduls im Schnitt höher ausfallen als die gemessenen Speicherinhalte. Dafür sind die folgenden Hauptursachen verantwortlich:

1. Die Entnahme- bzw. Entziehungsmengen aus dem Ruhreinzugsgebiet sind größer als die in der Simulation des historischen Zeitraums angenommenen und machen größere Mindestwasserabgaben nötig (Entnahme bzw. Entziehung entspricht dem Mittelwert der vorhandenen Daten ab 1990; diese Mengen waren im Zeitraum vor 1990 deutlich größer).
2. Bei der historischen Abgabesteuerung werden Abgaben festgelegt, die größer sind als die Mindestwasserabgaben (z. B. wegen Baumaßnahmen, größerer Betriebsfaktoren, höherer Mindestwassermengen am Pegel Oeventrop, Sicherheitszuschläge).

Es sei angemerkt, dass bei Anwendung des dargestellten Talsperrenmanagements sowohl die Mindestwasserabgaben an den Talsperren als auch die Abflüsse an den Bezugspegeln eingehalten werden.

In den gemessenen und berechneten Ganglinien z.B. der Biggetalsperre (Bild 27) kann gut nachvollzogen werden, wie sich der Füllstand aufgrund der jährlichen Variation des Hochwasserrückhalte-raums verändert. Es kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass durch das implementierte Talsperrenmanagement die Speicher-

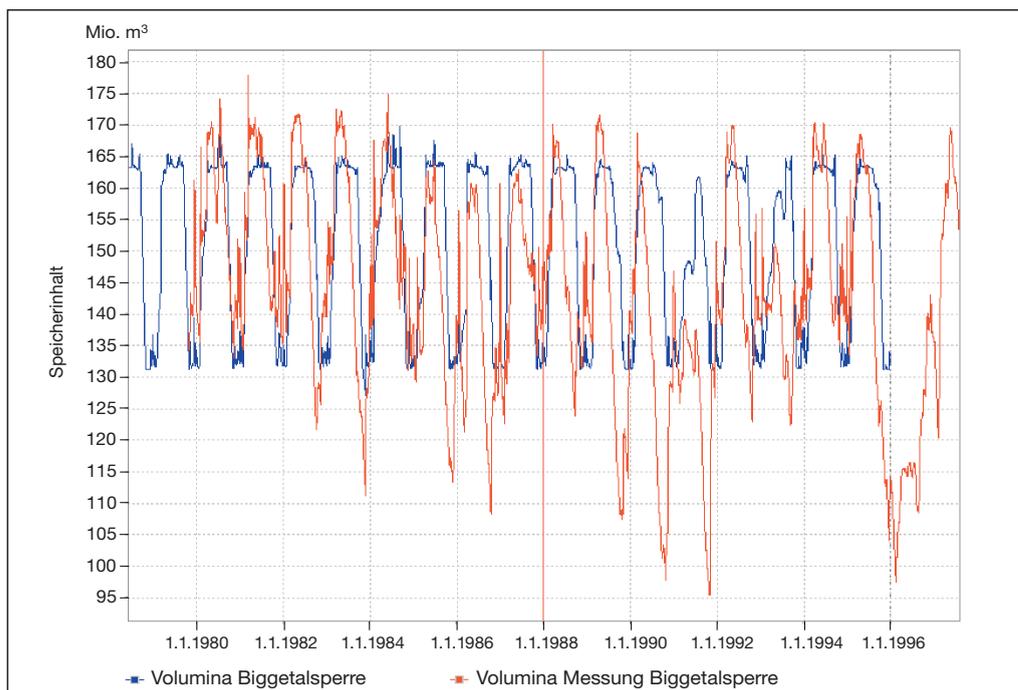


Bild 27: Ganglinien der gemessenen und berechneten Volumina der Biggetalsperre
 Fig. 27: Comparison of the measured and computed reservoir volumes of the Bigget reservoir

kapazitäten (unter Einhaltung der Mindestwasserabgaben) voll ausgenutzt werden. Für die Kapazitätsanalyse bedeutet dies, dass mit diesem Management die größten Kapazitätsreserven zu erwarten sind.

Betriebsfaktor und Wirkungsgrad

Als „Betriebsfaktor“ wird beim Ruhrverband der Quotient aus dem tatsächlich geleisteten Zuschuss der Talsperren und dem rechnerisch erforderlichen Zuschuss zur Einhaltung der Grenzwerte an den Bezugspegeln bezeichnet. Sein reziproker Wert wird als „wasserwirtschaftlicher Wirkungsgrad“ bezeichnet.

Eine Analyse des Betriebsfaktors bzw. des Wirkungsgrads des implementierten Talsperrenmanagements wurde anhand des Jahres 1976 durchgeführt, in dem im historisch simulierten Zeitraum von 1961–1995 die größten Zuschussleistungen der Talsperren vorliegen. Die Differenz des mittleren Abflusses an den Bezugspegeln Villigst, Hattingen und Ruhmündung und der gesetzlich vorgegebenen Mindestwassermenge entspricht der Differenz aus tatsächlich geleisteten Zuschuss und dem rechnerisch erforderlichen Zuschuss. Die tatsächliche Zuschussmenge wurde aus den Talsperrenabgaben über eine Mittelung der Abgaben im identischen Zeitraum ermittelt.

Der mit dem Talsperrenmodul simulierte Betriebsfaktor an der Ruhmündung von 1,13 bzw. der Wirkungsgrad von 0,88 charakterisiert die Regelgüte der gesamten Talsperrenbewirtschaftung des Ruhrsystems. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen, in denen noch ein Faktor von 1,23 angenommen wurde, liegt dieser Wert näher am Optimum „Eins“ und repräsentiert eine verbesserte bzw. „schärfere“ Talsperrenbewirtschaftung.

Bei der realen Bewirtschaftung des Talsperrensystems durch den Ruhrverband konnten mit Hilfe der in den letzten Jahren aufgebauten integrierten Bewirtschaftung im Vergleich zum implementierten Talsperrenmanagement ähnlich gute Betriebsfaktoren erzielt werden. Dabei wurden am Pegel Villigst ebenfalls Wirkungsgrade bis 0,94 nachgewiesen. Es sei angemerkt, dass das Talsperrenmanagement im operationellen Betrieb wesentlich schwieriger zu realisieren ist als in der in diesem Projekt durchgeführten Langfristsimulation. Störgrößen wie die Wasserentnahme können dann nicht als bekannt vorausgesetzt werden, sondern müssen in ihrem zukünftigen Verlauf aufwändig abgeschätzt werden.

10.3 Szenarienrechnungen

Die Langfristanalyse des Ruhrtalsperrensystems wird anhand von acht Simulationen durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Basisszenario (S0), mit dem der Ist-Zustand des Systems abgebildet wird, und sieben Szenarien, die weiterführende Fragen im Hinblick auf die Kapazitätsreserven des Systems analysieren. Tabelle 16 gibt einen Überblick über alle durchgeführten Berechnungen.

Tabelle 16: Übersicht der Szenarien
Table 16: List of scenarios

Szenario		Bemerkung
S0	Basisszenario	Referenzberechnung: aktuelle Bewirtschaftungsregeln, Entziehung 8 m ³ /s
S1	Wassernutzung	Erhöhung der Entziehung auf 9,3 m ³ /s
S2	Wassernutzung (Maniak)	Erhöhung der Entziehung auf 11,5 m ³ /s (negative Talsperrenvolumina sind möglich)
S3	Hochwasserschutzraum	Ausweitung des Hochwasserschutzraumes (HWSR)
S4	Grenzwert Hagen-Hohenlimburg	Einführung eines Grenzwertes von 10,0 m ³ /s am Pegel Hagen-Hohenlimburg/Lenne
S5	Anpassung der Mindestwasserabgaben	Dynamisierung der Mindestwasserabgaben der Talsperren
S6	S3+S4+S5	Kombination der Szenarien S3, S4 und S5
S7	Reduktion Grenzwert Villigst	Absenkung des Grenzwertes in Villigst auf 6,6 m ³ /s

Für die Berechnung der Szenarien werden vier von zehn der synthetischen Zeitreihen verwendet. Dabei handelt es sich um die Reihen R2, R3, R6 und R9 mit einer Simulationsdauer von insgesamt 4.000 Jahren. Die minimalen Niederschlagssummen dieser Reihen liegen bei einem Integrationszeitraum von fünf Jahren im Mittelfeld der zehn vorhandenen Reihen.

10.3.1 Basisszenario S0

Das Basisszenario S0 gibt hinsichtlich der Talsperrenbewirtschaftung und der Wasserentziehung den aktuellen Systemzustand wieder.

Im oben beschriebenen Simulationszeitraum von insgesamt 4.000 Jahren treten maximal acht Versagensfälle auf. In Tabelle 17 ist die Anzahl der Versagensereignisse und die Unterschreitungsdauer eines Speichervolumens von 2 % der Staukapazität für alle sechs großen Talsperren zusammengefasst. Alle Versagensereignisse finden ausschließlich in der Nordgruppe statt.

Ein Wiederkehrintervall für ein Versagen berechnet sich aus der Division des untersuchten Zeitraums durch die Anzahl der aufgetretenen Versagensereignisse. Dieses Verfahren liefert allerdings nur abgesicherte Ergebnisse, sofern in einem untersuchten Zeitraum mehrere Versagensfälle auftreten. Dem Versagen der Nordgruppe (achtmal innerhalb von 4.000 Jahren) kann somit ein Wiederkehrintervall von ca. 500 Jahren zugeordnet werden. Das Wiederkehr-

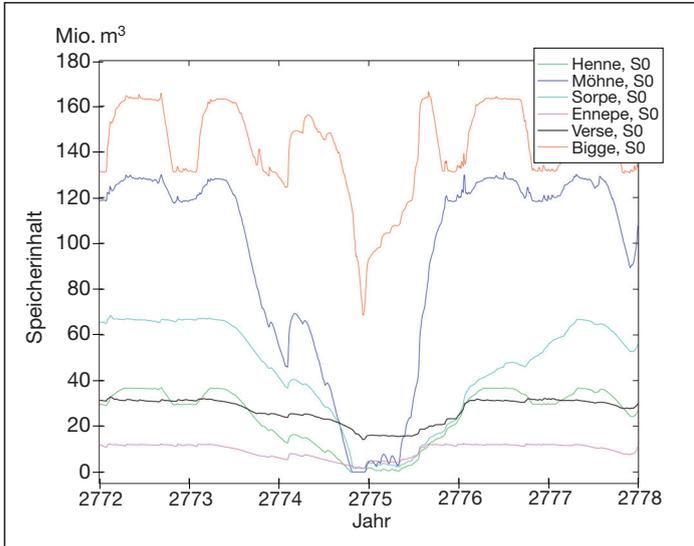


Bild 28: Szenario S0 (Ist-Zustand): Ganglinien der Speicherinhalte der Einzeltalsperren am Beispiel eines Versagensereignisses an Henne-, Möhne- und Sorpetalsperre

Fig. 28: Scenario S0 (current state): Hydrographs of the reservoirs volumes during a system failure at the Henne, Moehne and Sorpe reservoirs

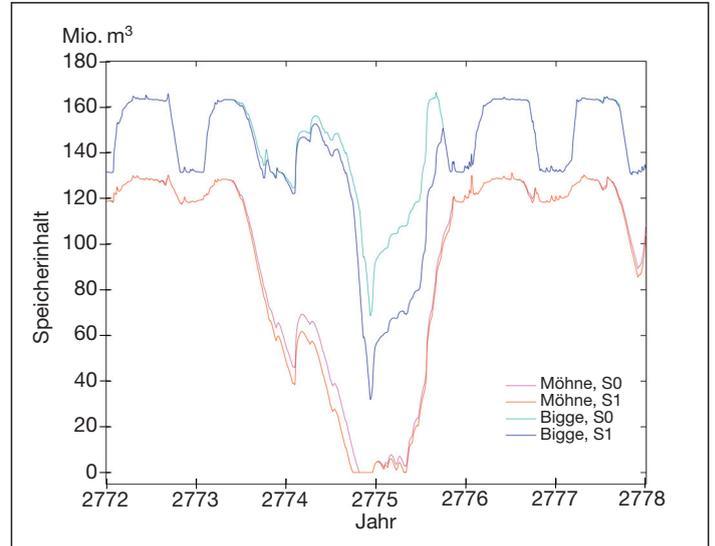


Bild 29: Szenario S1 (erhöhte Entziehung): Ganglinien der Speicherinhalte der Möhne- und Biggetalsperre im Vergleich mit Szenario S0

Fig. 29: Scenario S1 (increased water export): Hydrographs showing the storage volume of the Moehne and Bigge reservoirs compared with the results of Scenario S0

intervall für ein Versagen der Südgruppe liegt für den Ist-Zustand wahrscheinlich deutlich über einem Wert von 4.000 Jahren. In Bild 28 ist einer der Versagensfälle in Zeitreihe R9 dargestellt.

10.3.2 Szenario S1

In Szenario S1 wird die Entziehung aus dem Ruhrtalsperrensystem um 15 % von 8,0 auf 9,3 m³/s erhöht. Mit dieser Erhöhung entspricht die Entziehung dem Mittelwert der Entziehung in den Jahren 1991–2003. Diese Variante dient dazu, die Wirkung einer erhöhten Beanspruchung des Talsperrensystems abzuschätzen. Die im Simulationszeitraum von insgesamt 4.000 Jahren ermittelten Versagensereignisse sind in Tabelle 18 im Vergleich zu Szenario S0 (in Klammern) zusammengestellt.

Tabelle 17: Versagensereignisse der Talsperren in Szenario S0
Table 17: Failure statistics for Scenario S0

Talsperre	Unterschreitungsdauer [d]	Anzahl Ereignisse	Versagensintervall [Jahre]
Henne	890	8	500
Möhne	703	8	500
Sorpe	739	7	714
Ennepe	0	0	0
Verse	0	0	0
Bigge	0	0	0

Ein wesentlicher Unterschied im Vergleich zum Szenario S0 ist das Auftreten zweier zusätzlicher Versagensfälle an der Möhnetalsperre. In der Nordgruppe vergrößert sich die Unterschreitungsdauer um ca. 100 %. In der Südgruppe findet, wie in Tabelle 18 am Beispiel der Biggetalsperre dargestellt, auch in S1 kein Versagensfall statt.

In Bild 29 ist eines der beobachteten Versagensereignisse anhand der Speicherinhalte der Möhne- und Biggetalsperre dargestellt. Es lässt sich gut nachvollziehen, wie die Füllstände im Vergleich von S0 zu S1 bei einem identischen Niveau starten und danach mit längerer Zuschussperiode aufgrund der höheren Entziehung auseinander laufen.

Tabelle 18: Versagensereignisse der Talsperren in Szenario S1
Table 18: Failure statistics for Scenario S1

Talsperre	Unterschreitungsdauer S1 (S0) [d]	Anzahl Ereignisse S1 (S0)	Versagensintervall S1 (S0) [Jahre]
Möhne	1.380 (703)	10 (8)	400 (500)
Bigge	0 (0)	0 (0)	0 (0)

10.3.3 Szenario S2

Szenario S2 lehnt sich an eine von Maniak 1993 durchgeführte Untersuchung zur Leistungsfähigkeit des Ruhrtalsperrensystems an. Die in dieser Analyse verwendete Entziehung von $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ stellt im Vergleich zum Basisszenario eine Erhöhung von 43 % dar.

Die folgenden Resultate basieren wiederum auf der Auswertung der Berechnungen mit den synthetischen Ganglinien R2, R3, R6 und R9. Die in diesem Zeitraum vorhandenen Versagensereignisse sind in Tabelle 19 im Vergleich zu Szenario S0 zusammengestellt.

Es fällt auf, dass sowohl die Anzahl der Versagensereignisse als auch die Dauer dieser Ereignisse signifikant zunimmt. Es treten nun auch acht Versagensfälle in der Südgruppe auf. Allen Ereignissen in der Südgruppe geht ein vorheriges Versagen in der Nordgruppe voraus.

Tabelle 19: Versagensereignisse der Talsperren in Szenario S2
Table 19: Failure statistics for Scenario S2

Talsperre	Unterschreitungsdauer S2 (S0) [d]	Anzahl Ereignisse S2 (S0)	Versagensintervall S2 (S0) [Jahre]
Möhne	2.874 (703)	18 (8)	278 (500)
Bigge	510 (0)	8 (0)	500 (0)

Bei einem 18-maligen Versagen des Talsperrensystems in Szenario S2 in einem Simulationszeitraum von 4.000 Jahren kann dem Versagen von Talsperren eine Eintrittswahrscheinlichkeit von ca. 280 Jahren zugeordnet werden. Nach Analyse der gesamten Zeitreihe fällt auf, dass sich einige weitere Ereignisse an der Schwelle zum Versagen befinden. Es ist somit zu erwarten, dass sich die Anzahl der Versagensfälle mit einer weiter erhöhten Entziehung signifikant erhöht. Einem Folgeversagen in der Südgruppe kann eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 500 Jahren zugeordnet werden.

10.3.4 Szenario S3

In Szenario S3 wird die Erweiterung des Hochwasserschutzraumes an der Bigge-, Henne- und Möhnetalsperre sowie die Schaffung neuer Hochwasserschutzräume an der Sorpe-, Verse- und Ennepetalsperre untersucht. Bild 30 zeigt dies am Beispiel der Biggetalsperre. Im Gegensatz zum Basisszenario werden in S3 auch in der Sommerperiode Hochwasserschutzräume vorgehalten. Die Entziehung beträgt in ihrer Summe $8 \text{ m}^3/\text{s}$ und entspricht der Entziehung im Basisszenario S0.

Im Zeitraum von 4.000 Jahren traten 9 Versagensereignisse auf.

Abgesehen von einem zusätzlichen Versagensfall an der Möhnetalsperre treten in S3 im Vergleich zu S0, abgesehen von einer leichten Erhöhung der Unterschreitungsdauer, keine wesentlichen Unterschiede auf. Die Ganglinien des schon vorher beschriebenen

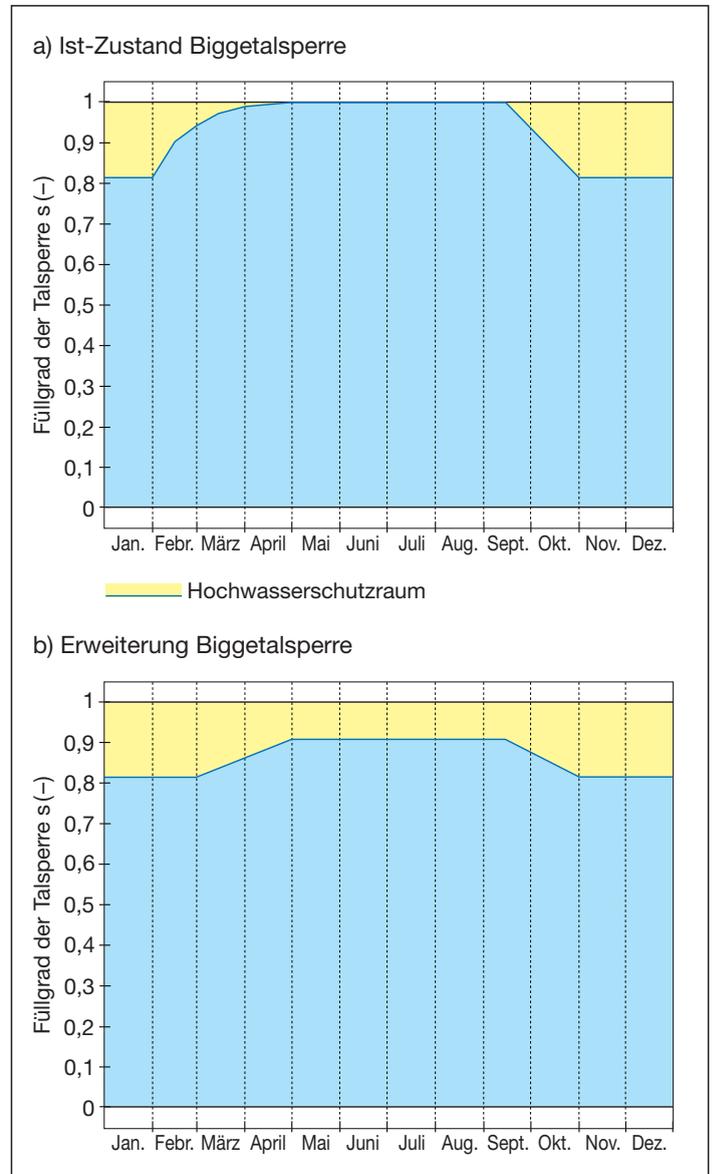


Bild 30: Szenario S3 (erweiterter Hochwasserschutzraum):

- a) Ist-Zustand und
 - b) Erweiterung des Hochwasserschutzraumes der Biggetalsperre
- Fig. 30: Scenario S3 (additional flood retention capacity).
- a) actual situation and
 - b) enlargement of flood retention volume at the Bigge reservoir

Extremereignisses um das Jahr 2775 sind in Bild 31 dargestellt. Es ist gut sichtbar, dass sich die Ausweitung des Hochwasserschutzraumes wie eine Anfangsbedingung in den Ganglinien bemerkbar macht. Die Speicherinhalten von S0 und S3 haben in der Zuschussperiode eine konstante Differenz und laufen nicht mehr wie bei der Erhöhung der Entziehung auseinander. Ihre Differenz ist nicht mehr abhängig von der Zuschussdauer.

Der Effekt einer Ausweitung des Hochwasserschutzraumes im Hinblick auf die Betriebssicherheit der Talsperren entspricht maximal dem zusätzlich definierten Hochwasserschutzraum. Diese Differenz ist von der Dauer der Zuschussperiode unabhängig.

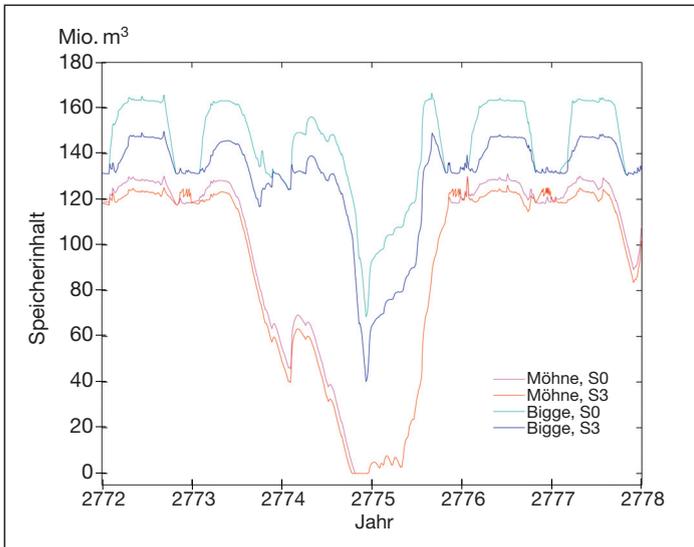


Bild 31: Szenario S3 (erweiterter HW-Schutzraum): Ganglinien der Speicherinhalte der Möhne- und Biggetalsperre im Vergleich zu Szenario S0
 Fig. 31: Scenario S3 (additional flood retention capacity): Hydrographs showing the storage volume of the Moehne and Bigge reservoirs compared with the results of scenario S0

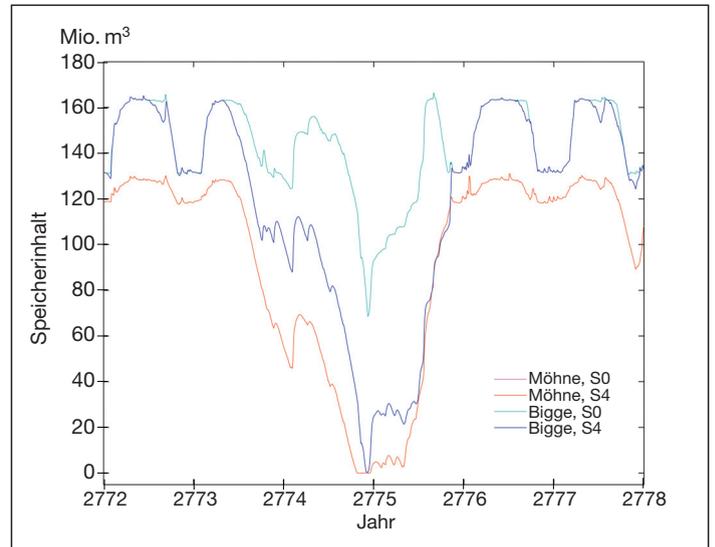


Bild 32: Szenario S4 (zusätzlicher Grenzwert in Hohenlimburg): Ganglinien der Speicherinhalte der Möhne- und Biggetalsperre im Vergleich zu Szenario S0
 Fig. 32: Scenario S4 (additional control section at Hohenlimburg): Hydrographs showing the storage volume of the Moehne and Bigge reservoirs compared with the results of Scenario S0

10.3.5 Szenario S4

In Szenario S4 wird zusätzlich zu den Pegeln Oeventrop, Villigst und Hattingen ein weiterer Bezugspegel in Hagen-Hohenlimburg an der Lenne definiert, an dem eine Mindestwassermenge von 10 m³/s im Tagesmittel vorgeschrieben wird.

Ein Bezugspegel in Hohenlimburg kann nur über die Verse- und Biggetalsperre gestützt werden. Auf die Zuschussleistung der Talsperren der Nordgruppe und die dortigen Versagensereignisse hat er deshalb keinen Einfluss.

In der Südgruppe tritt mit der Einführung des Bezugspegels ein siebenmaliges, von der Nordgruppe weitgehend unabhängiges Versagen der Talsperren innerhalb des Simulationszeitraums statt. Damit liegt die Versagenswahrscheinlichkeit für dieses Szenario bei 571 Jahren. In Bild 32 wird ersichtlich, welche gravierenden Auswirkungen der neue Grenzwert auf die Bewirtschaftung des Systems haben kann. In dem betrachteten Ereignis um das Jahr 2775 liegt die Speicherinhaltslinie der Biggetalsperre in S4 um bis zu 70 Mio. m³ niedriger als ohne den neuen Grenzwert in S0.

Der zusätzliche Zuschuss von 2,5 m³/s über die gesamte Zuschussperiode ist hauptsächlich von der Biggetalsperre zu leisten und erklärt ihre wesentlich höhere Inanspruchnahme. Zusätzliche Berechnungen ergaben, dass ein zusätzlicher Zuschuss von 2,5 m³/s über eine Zuschussdauer von einem Jahr einem Volumen von 78,8 Mio. m³ entspricht. Ein Grenzwert von bis zu 7,5 m³/s sollte am Pegel Hohenlimburg realisierbar sein, ohne die Betriebssicherheit des Talsperrensystems wesentlich zu beeinflussen. Die Zuschussleistung der Biggetalsperre dürfte damit gleichwertig von den

Grenzwerten an den Pegeln Hohenlimburg und Hattingen bestimmt werden, ohne einen zusätzlichen Zuschuss im Hinblick auf den Pegel Hohenlimburg zu leisten.

10.3.6 Szenario S5

In Szenario S5 werden die Mindestwasserabgaben an der Verse-, Bigge-, Sorpe-, Henne- und Möhnetalsperre dynamisiert, d. h. die konstante Mindestwasserabgabe (Basisszenario S0) wird durch eine monatsweise variierende, dem natürlichen Abflussregime angepasste Mindestwasserabgabe ersetzt. Die neue Mindestwasserabgabe orientiert sich am mittleren Niedrigwasser MNQ der Talsperrenzuflüsse. Die neue Mindestwasserabgabe ist insbesondere im Winter deutlich höher als die alte konstante Mindestwasserabgabe.

Die vorgeschriebene Mindestwasserabgabe an der Ennepetalsperre besitzt schon einen Jahreszyklus, der darüber hinaus abhängig vom Füllstand der Talsperre ist. Diese Regel wurde in Szenario S5 nicht verändert.

Tabelle 20: Versagensereignisse der Talsperren in Szenario S5
 Table 20: Failure statistics for Scenario S5

Talsperre	Unterschreitungsdauer S5 (S0) [d]	Anzahl Ereignisse S5 (S0)	Versagensintervall S5 (S0) [Jahre]
Möhne	2.620 (703)	13 (8)	308 (500)
Bigge	182 (0)	4 (0)	1.000 (0)

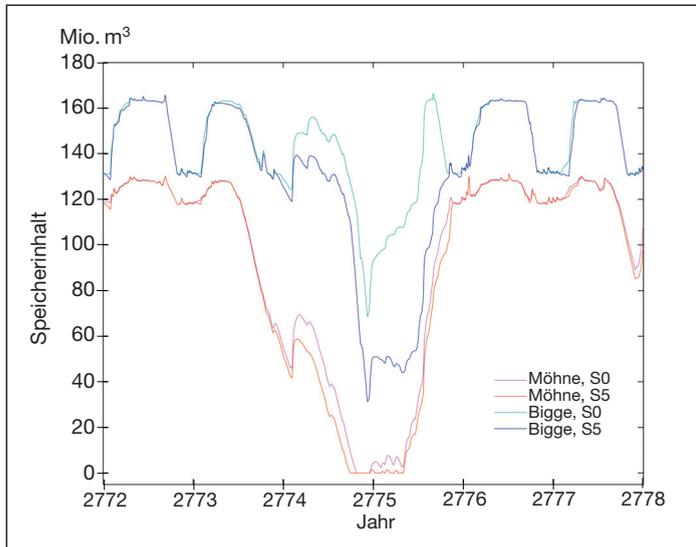


Bild 33: Szenario S5 (dynamisierte Mindestwasserabgaben):
Ganglinien der Speicherinhalte der Möhne- und Biggetalsperre im Vergleich zu Szenario S0

Fig. 33: Scenario S5 (increased minimum discharges at reservoirs):
Hydrographs showing the storage volume of the Moehne and Bigge reservoirs compared with the results of Scenario S0

Die im Zeitraum von 4.000 Jahren vorhandenen Versagensereignisse sind in Tabelle 20 im Vergleich zu Szenario S0 zusammengestellt. Die Erhöhung der Mindestwasserabgaben der Talsperren hat einen signifikanten Effekt auf die Anzahl der Versagensereignisse und ihre Dauer.

Anhand des extremsten Versagensfalls in den Jahren 2772 bis 2778 kann der Effekt der erhöhten Mindestwasserabgaben verdeutlicht werden (Bild 33). Am Beginn der Zuschussperiode besteht praktisch kein Unterschied zwischen den Szenarien S0 und S5. Die Abgabe der Talsperren wird über die Mindestwassermenge an den Bezugspegeln festgelegt und ist höher als die Mindestwasserabgabe an den einzelnen Talsperren. Ein deutlicher Unterschied tritt ab dem Zeitpunkt auf, an dem sich die Speicherinhalte aufgrund eines höheren Niederschlags (Beginn 2775) stabilisieren oder sich wieder leicht auffüllen. Aufgrund der höheren Mindestwasserabgabe laufen die beiden Ganglinien von S0 und S5 an der Biggetalsperre nun deutlich auseinander.

10.3.7 Szenario S6

Szenario 6 besteht aus einer Kombination der Szenarien S3 (Erweiterter Hochwasserschutzraum), S4 (Grenzwert Hohenlimburg) und S5 (Erhöhung und Dynamisierung der Mindestwasserabgaben). Die Entziehung beträgt $8 \text{ m}^3/\text{s}$ und entspricht der Entziehung in Szenario S0.

Die im Zeitraum von 4.000 Jahren vorhandenen Versagensereignisse zeigen mit 16 Ereignissen eine deutliche Erhöhung von Versagensereignissen in der Nordgruppe, zusätzlich treten nun in der Südgruppe elf Versagensereignisse auf.

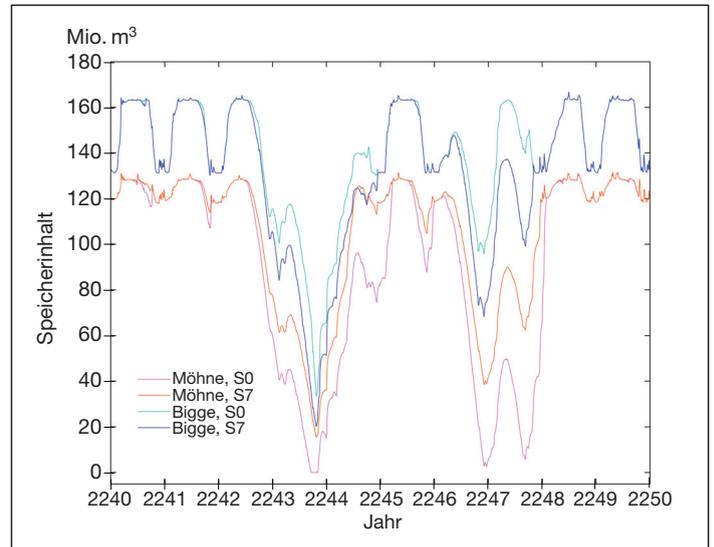


Bild 34: Szenario S7 (Reduktion des Grenzwertes Villigst):
Ganglinien der Speicherinhalte der Möhne- und Biggetalsperre im Vergleich zu Szenario S0

Fig. 34: Scenario S7 (reduced minimum runoff at Villigst):
Hydrographs showing the storage volume of the Moehne and Bigge reservoirs compared with the results of Scenario S0

Die Zusammenfassung der Szenarien mit einem angepassten Talsperrenmanagement hat somit eine ähnliche Wirkung auf die Versorgungssicherheit wie die Erhöhung der Entziehung von $8 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

10.3.8 Szenario S7

In Szenario S7 wird am Bezugspegel Villigst der Grenzwert für die Mindestwassermenge von $8,4$ auf $6,6 \text{ m}^3/\text{s}$ abgesenkt. Das Verhältnis des Grenzwerts von $6,6 \text{ m}^3/\text{s}$ in Relation zum Grenzwert von $15 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Hattingen verhält sich damit wie das Verhältnis der Fläche der Einzugsgebiete an beiden Pegeln, d. h. an beiden Pegeln wird die gleiche Abflussspende des Mindestabflusses angesetzt. Dieses Szenario dient somit zur Abschätzung der übermäßig hohen Beanspruchung des Systems aufgrund des überproportional hohen Grenzwertes für Villigst.

Im Zeitraum von 4.000 Jahren kommt es weder in der Nord- noch in der Südgruppe zu einem Versagensereignis. Es kann somit von einem Versagensintervall des Systems von mindestens 4.000 Jahren ausgegangen werden. Ein exakter Versagenswert lässt sich wegen des Fehlens von Versagensereignissen ohne eine deutliche Verlängerung der synthetischen Datengrundlage nicht ermitteln.

In Bild 34 sind die Füllstände der beiden großen Talsperren Bigge und Möhne für die beiden Szenarien S0 und S7 im Zeitraum 2240–2250 der Reihe R3 dargestellt. In diesem Zeitraum der insgesamt 4.000 Jahre langen Simulationsperiode treten in S7 die niedrigsten Talsperrenfüllstände auf.

Tabelle 21: Vergleich von Speichervolumina der Szenarien S0 und S7 für ein simuliertes Versagensereignis um das Jahr 2244

Table 21: Storage volume for Scenario S0 compared with the storage volume for Scenario S7 during a simulated failure event around the year 2244

Bezugspegel	Volumen S0 [Mio. m ³]	Volumen S7 [Mio. m ³]	Differenz [Mio. m ³]
Nordgruppe	1,6*	39,0	37,4
Südgruppe	44,6	27,2	-17,5
Gesamtvolumen	46,2	66,2	19,9

*Restvolumen, das der Talsperre nicht entnommen werden kann

Tabelle 22: Zusammenstellung der Versagensereignisse an der Möhnetalsperre in Szenario S0 – S7

Table 22: Summary of the failure statistics of the Moehne reservoir for the Scenarios S0 – S7

Szenario	Beschreibung	Unterschreitungs-dauer [d]	Anzahl Ereignisse	Versagensintervall [Jahre]
S0	Ist-Zustand	703	8	500
S1	Entziehung 9,3 m ³ /s	1.380	10	400
S2	Entziehung 11,5 m ³ /s	2.874	18	278
S3	HWSR	928	9	444
S4	Hagen-Hohenlimburg	703	8	500
S5	Mindestabgabe	2.620	13	308
S6	S3+S4+S5	2.940	16	250
S7	Villigst bei 6,6 m ³ /s	0	0	–

Tabelle 23: Zusammenstellung der Versagensereignisse an der Biggetalsperre in Szenario S0 – S7

Table 23: Summary of the failure statistics of the Bigge reservoir for the Scenarios S0 – S7

Szenario	Beschreibung	Unterschreitungs-dauer [d]	Anzahl Ereignisse	Versagensintervall [Jahre]
S0	Ist-Zustand	0	0	–
S1	Entziehung 9,3 m ³ /s	0	0	–
S2	Entziehung 11,5 m ³ /s	510	8	500
S3	HWSR	0	0	–
S4	Hagen-Hohenlimburg	215	7	571
S5	Mindestabgabe	182	4	1.000
S6	S3+S4+S5	1.311	11	364
S7	Villigst bei 6,6 m ³ /s	0	0	–

Eine weiterführende Betrachtung des Effektes der Abminderung des Grenzwertes ermöglicht die Analyse der minimalen Füllstände in der in Bild 34 dargestellten Periode (Tabelle 21). Es zeigt sich, dass in S7 im Vergleich zu S0 ein Wasservolumen von 19,9 Mio. m³ eingespart wird. Weiterhin wird ein Teil der Zuschussleistung (17,5 Mio. m³) von der Nord- auf die Südgruppe umgelagert.

Durch die Abminderung des Grenzwertes in Villigst kommt es zu einer deutlich besseren Auslastung des Talsperrensystems, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Systemversagens erheblich reduziert wird. Nord- und Südgruppe werden mit dieser Anpassung in etwa gleich beansprucht, da der Grenzwert in Hattingen jetzt für die Zuschussleistung aus den Talsperren entscheidend ist.

10.3.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tabelle 22 sind die Versagensfälle an der Möhne- und in Tabelle 23 an der Biggetalsperre für alle sieben Szenarien zusammengefasst. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Analyse der Zeitreihen R2, R3, R6 und R9, d. h. auf einen Simulationszeitraum von 4.000 Jahren.

10.4 Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse

10.4.1 Kapazitätsreserven des Systems und Grenzleistungsfähigkeit

In den früheren Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Ruhrtalsperrensystems (Maniak, 1993) nahm der Begriff der Grenzleistungsfähigkeit eine zentrale Stellung ein. Darunter wurde die maximale Entziehung verstanden, die mit dem Talsperrensystem unter den gegebenen Randbedingungen sowie den Bewirtschaftungsregeln ersetzt werden kann. Eine wesentliche Randbedingung sind dabei die Eingangsdaten, insbesondere die verwendeten Niederschläge, mit denen das System über einen definierten Zeitraum simuliert wird. Kann dieser Zeitraum wie bei der Verwendung von synthetisch erzeugten Zeitreihen im Vergleich zu den historischen Daten erheblich erweitert werden, vergrößert sich die Wahrscheinlichkeit auf extreme Ereignisse, was zu einer Verminderung der Grenzleistungsfähigkeit führt. Es erscheint daher sinnvoller, einer bestimmten Entziehung die Wahrscheinlichkeit eines Systemversagens bzw. dessen Wiederkehrintervall zuzuordnen, da dieser Parameter weitgehend unabhängig von der Länge der simulierten Ganglinie ist. Dieses Vorgehen entspricht der Bemessung eines Flussdeiches, der ebenfalls nur auf ein Hochwasserereignis mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit, wie beispielsweise einem HQ₁₀₀, bemessen wird.

Unter den aktuellen Betriebsbedingungen mit einer Entziehung von 8 m³/s tritt unter der Voraussetzung der vollen Verfügbarkeit der Talsperren ein Systemversagen in der Nordgruppe mit einem Wiederkehrintervall von ca. 500 Jahren auf. Ein Versagen der Südgruppe kann nicht genau quantifiziert werden, ist allerdings deutlich unwahrscheinlicher. Die Auswirkung einer erhöhten Entziehung

kann plausibel nachvollzogen werden. Dabei korreliert das Produkt aus der Erhöhung der Entziehung und der Länge der Zuschussperiode gut mit dem zusätzlich in Anspruch genommenen Speichervolumen der Talsperren.

Mit steigender Entziehung nimmt die Wahrscheinlichkeit eines Systemversagens in der Nordgruppe zu. Bei einer Erhöhung der Entziehung von 8,0 auf 11,5 m³/s verringert sich das Wiederkehrintervall auf ca. 280 Jahre. Da in den Langzeitsimulationen bei einer Entziehung von 11,5 m³/s mehrere Ereignisse beobachtet werden können, bei denen es fast zu einem Systemversagen kommt, nimmt das Wiederkehrintervall mit einer weiteren Erhöhung der Entziehung voraussichtlich signifikant ab. Die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen der Südgruppe kann mit ca. 500 Jahren angegeben werden und tritt insbesondere dann auf, wenn die Südgruppe aufgrund von leeren Speichern in der Nordgruppe die Zuschussleistung für den Pegel Hattingen übernimmt.

10.4.2 Auswirkungen eines veränderten Talsperrenmanagements

Verschiedene Eingriffe in das Talsperrenmanagement wirken sich sehr unterschiedlich auf die Kapazitätsreserven des Talsperrensystems aus. Die Auswirkung einer Erweiterung des Hochwasserschutzraums kann sehr gut nachvollzogen und auch in ihrer Grenz Wirkung gut abgeschätzt werden. Im ungünstigsten Fall entspricht das in einer Zuschussperiode benötigte zusätzliche Speichervolumen dem Volumen, um das der Hochwasserschutzraum ausgeweitet wurde.

Die Einführung einer Mindestwassermenge in der Größenordnung von 10 m³/s an einem zusätzlichen Bezugspegel in Hagen-Hohenlimburg an der Lenne hat gravierende Auswirkungen auf die Kapazitätsreserven des Talsperrensystems. Mit der Einführung dieses Grenzwerts ist die Zuschussmenge aus der Südgruppe nicht mehr abhängig vom Grenzwert am Pegel Hattingen, sondern wird vom Grenzwert am Pegel Hagen-Hohenlimburg geprägt. Sollte die Einführung einer Mindestwasserabgabe am Pegel Hagen-Hohenlimburg erwogen werden, sollte mit Hilfe von weiteren Szenarienberechnungen die Mindestwassermenge derart abgesenkt werden (vermutlich auf 7–8 m³/s), dass dieser Bezugspegel nicht mehr für die Zuschussleistung der Biggetalsperre prägend ist.

Eine Erhöhung der Mindestwasserabgabe der einzelnen Talsperren bzw. eine Dynamisierung der Mindestwasserabgabe über das Jahr kann in ihrer Wirkung sehr unterschiedlich ausfallen. Dies hängt davon ab, ob eine Niedrigwasserperiode mit einer Zuschussleistung der Talsperren durchgängig stattfindet oder durch eine bzw. mehrere Perioden mit höherem Niederschlag, die zu einer Wiederauffüllung der Speicher führen, unterbrochen wird. Die Wiederauffüllung der Talsperren kann durch die Erhöhung der Mindestwasserabgaben erheblich verlangsamt werden.

Eine systemkonforme Reduzierung des Grenzwertes in Villigst auf einen Mindestabfluss von 6,6 m³/s erhöht das Versagensintervall von derzeit ca. 500 Jahre auf mehr als 1.000 Jahre, bewirkt also eine erhebliche Reduktion des Risikos eines Systemversagens.

10.4.3 Ergebnisse im Vergleich zu früheren Untersuchungen

Der Vergleich dieser Studie mit früheren Untersuchungen bezieht sich hauptsächlich auf das von Maniak (1993) erstellte Gutachten über die Leistungsfähigkeit des Ruhralsperrensystems nach Einführung des Ruhrverbandsgesetzes von 1990. Die Rahmenbedingungen der in Szenario S2 durchgeführten Berechnung sind weitgehend identisch mit dem oben zitierten Gutachten. Unterschiede ergeben sich aber aufgrund der folgenden Punkte:

- Im Maniak-Gutachten wurde die Grenzleistungsfähigkeit des Talsperrensystems auf der Grundlage historischer Zeitreihen von 1956 bis 1989 auf Tageswertbasis ermittelt. Die durchgeführte Analyse mit synthetischen Monatsmitteln über einen Zeitraum von 500 Jahren lieferte keine extremeren Systemzustände als die Analyse mit den Tagesmitteln und wurde deshalb nicht für die Beurteilung der Grenzleistungsfähigkeit herangezogen. Die im aktuellen Projekt erzeugten synthetischen Ganglinien auf Tageswertbasis über einen Zeitraum von 10 x 1.000 Jahren zeigen dagegen deutlich extremere Niederschlagssummen als die in den historischen Daten vorgefundenen. Die meteorologischen Randbedingungen dieser Studie sind somit extremer, was wiederum zu einer stärkeren Beanspruchung des Talsperrensystems führt.
- Der rechnerische Betriebsfaktor in dieser Studie liegt bei ca. 1,13 am Pegel Hattingen im Gegensatz zu einem von Maniak verwendeten Faktor von 1,23. Der aktuell verwendete Faktor spiegelt die verbesserte Steuerung des Talsperrensystems wieder, was zu einem sparsameren Umgang mit den Ressourcen und damit zu größeren Kapazitätsreserven führt.
- Die Aufteilung des Talsperrenzuschusses auf die verschiedenen Speicher zur Einhaltung der Mindestwassermenge an einem Bezugspegel wird durch das Talsperrenmanagementmodul automatisch optimiert, so dass die im Maniak-Gutachten durchgeführte Variantenuntersuchung bezüglich der Zuschussaufteilung auf die einzelnen Talsperren entfallen kann.

Der im Maniak-Gutachten definierten Grenzleistungsfähigkeit des Systems von 11,5 m³/s kann aufgrund der in dieser Studie durchgeführten Untersuchung ein Wiederkehrintervall von ca. 280 Jahren zugeordnet werden. Wie schon oben diskutiert ist davon auszugehen, dass sich dieser Wert bei höheren Entziehungen stark vermindern wird.

10.4.4 Anforderungen der DIN 19700

In DIN 19700 wird für eine Talsperre die Erstellung eines Bewirtschaftungsplans mit zugehörigen Betriebsregeln gefordert. Als Nachweis für deren Funktionsfähigkeit werden Langzeitsimulationen des Talsperrensystems vorgeschlagen. Die dazu erforderlichen Betriebsregeln wurden für die Talsperren ausformuliert und parametrisiert. Die damit im Rahmen dieser Studie durchgeführten Langzeitsimulationen des Ruhralsperrensystems entsprechen den Anforderungen der DIN 19700.

10.5 Fazit und Ausblick

Auf der Basis des Softwaresystems Delft-FEWS wurde ein Instrument entwickelt, mit dem die Grenzleistungsfähigkeit bzw. die langfristige Betriebssicherheit des Ruhrtalsperrensystems in Niedrigwasserperioden beurteilt und analysiert werden kann. In das System wurden bestehende Modelle des Ruhrverbands integriert und im Hinblick auf ihre Verwendung in der Langfristanalyse validiert. Durch eine Schulung im Gebrauch der Software wurden Mitarbeiter des Ruhrverbands dazu befähigt, selbständig weitere Analysen und Szenarioberechnungen durchzuführen.

Eine wesentliche Grundlage für die Langzeitsimulation des Talsperrensystems war die Erzeugung synthetischer Niederschlagszeitreihen über einen Gesamtzeitraum von insgesamt 10.000 Jahren. Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Zeitreihen im Vergleich zu den Referenzdaten aus den Jahren 1961–1995 weitgehend identische statistische Parameter besitzen. Aufgrund der größeren Länge der Zeitreihen nimmt die Chance auf Extremereignisse in den Reihen zu und es treten wie erwünscht Perioden mit geringeren Niederschlagssummen als in den historischen Reihen auf.

Es konnte gezeigt werden, dass es sinnvoll ist, einer bestimmten Beanspruchung des Systems, ausgedrückt durch die Entziehung, die Wahrscheinlichkeit eines Systemversagens zuzuordnen und durch Variation von Randbedingungen in Form von Szenarien die Veränderung der Versagenswahrscheinlichkeit zu quantifizieren. Auf diese Weise lässt sich u. a. die Sensitivität des vorhandenen wasserwirtschaftlichen Systems gegenüber veränderten Anforderungen ermitteln.

Das vorgestellte System, dem die Annahme zugrunde liegt, dass die Klimasituation der Jahre 1961–1995 stationär und repräsentativ für die Zukunft ist, ermöglicht es, auch die Auswirkungen von zukünftigen Klimaänderungen auf die Versorgungssicherheit des Systems zu untersuchen; dazu müssen lediglich die Eingangsdaten (z. B. Niederschlag, Lufttemperatur) entsprechend den Ergebnissen von Klimaänderungsprognosen modifiziert und darauf aufbauende Langfristbewirtschaftungsanalysen durchgeführt werden.

Somit bietet das vorgestellte Analysenwerkzeug die Möglichkeit, auf neue Anforderungen an das Talsperrensystem angemessene und belastbare Antworten zu geben.

Literatur:

- Beersma, J.J. (2002): Rainfall Generator for the Rhine Basin; Description of 1000-year simulations, KNMI publication 186-v, KNMI, 2002, De Bilt.
- Brudy-Zippelius, T. (2003): Wassermengenbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Ruhr: Simulation und Echtzeitbetrieb, Dissertation der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2003
- Buishand, T.A.; Brandsma, T. (2001): Multi-site simulation of daily precipitation and temperature in the Rhine basin by nearest-neighbour resampling, *Water Resources Research*, 37, pp. 2761-2776
- Fiering, M.B. (1967): *Streamflow synthesis*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Haude, W. (1958): Über die Verwendung verschiedener Klimafaktoren zur Berechnung der potentiellen Evaporation und Evapotranspiration. *Met. Rundschau* 11, Seite 96-99.
- Hurst, H.E. (1951): Long term storage capacities of reservoirs, *Trans. ASCE*, 116, pp. 776-808
- Maniak, U. (1993): Gutachten über die Leistungsfähigkeit des Talsperrensystems des Ruhrverbands nach dem Ruhrverbandsgesetz vom 7.2.1990, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, April 1993
- Morgenschweis, G. (1985): On the Estimation of Lake Evaporation Losses for the Operation of the Ruhr Reservoir System, *Beiträge zur Hydrologie Sonderheft* 5.1, pp. 93-109, Kirchzarten, 1985
- Morgenschweis, G. (2001): Echtzeitbewirtschaftung eines Flussgebietes am Beispiel der Ruhr. *Wasserwirtschaft* 91 (2001), 12, Seite 575-581
- WL | Delft Hydraulics (2006): *Langzeitbewirtschaftungsanalyse Ruhrtalsperrensystem*. Delft, Januar 2006.
- Wójcik, R.; Beersma, J.J.; Buishand, T.A. (2000): Rainfall Generator for the Rhine Basin: Multi-site generation of weather variables for the entire drainage area, KNMI publication 186-iv, KNMI, 2000, De Bilt.



Kronprinzenstraße 37, 45128 Essen
Postfach 10 32 42, 45032 Essen
Telefon (02 01) 178-0
Fax (02 01) 178-14 25
www.ruhrverband.de

Nachdruck – auch auszugsweise –
nur mit Quellenangabe gestattet.

Gedruckt auf umweltfreundlich hergestelltem
Papier aus 50% recycelten Fasern.