

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Proceedings, Published Version

**Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.)**

## **Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz**

BfG-Veranstaltungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107662>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.) (2017): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-Veranstaltungen, 5/2017). [https://doi.org/10.5675/BfG\\_Veranst\\_2017.5](https://doi.org/10.5675/BfG_Veranst_2017.5).

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

5/2017

## Veranstaltungen

Modellierung aktueller Fragestellungen zur  
Wassermengenbewirtschaftung an  
Bundeswasserstraßen

Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz

Koblenz, August 2017

# Impressum

Herausgeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Am Mainzer Tor 1  
Postfach 20 02 53  
56002 Koblenz  
Tel.: +49 (0)261 1306-0  
Fax: +49 (0)261 1306 5302  
E-Mail: [posteingang@bafg.de](mailto:posteingang@bafg.de)  
Internet: <http://www.bafg.de>

Druck: Druckerei des BMVI, Bonn

**ISSN 1866 – 220X**

**DOI: 10.5675/BfG\_Veranst\_2017.5**

*Zitiervorschlag:*

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, Koblenz, August 2017, 156 S.;  
DOI: 10.5675/BfG\_Veranst\_2017.5

# Inhalt

<b>Vorwort .....</b>	<b>5</b>
----------------------	----------

## **Wasserbewirtschaftung – national und international**

<b>Wasserkraft in Vorarlberg.....</b>	<b>6</b>
---------------------------------------	----------

Peter Matt

<b>Trinkwasserversorgungssystem Wien.....</b>	<b>14</b>
---	-----------

Paul Hellmeier

### **Wie bringen wir Modelldaten und Wasserwirtschaftspraxis zusammen?**

<b>Beispiel Wasserknappheitskarten in der Schweiz.....</b>	<b>23</b>
--	-----------

Samuel Zahner

## **Daten zur Wassernutzung – Vergangenheit bis Gegenwart**

<b>Wasserbewirtschaftungsdaten – Grundlage für Systemverständnis und Modellierung ..</b>	<b>32</b>
--	-----------

Jochen Hohenrainer

<b>Datenbanksystem für Wassernutzungsdaten ÜWA (Informationssystem Überregionale Wasserbewirtschaftung).....</b>	<b>44</b>
--	-----------

Harald Roth

<b>Amtliche Wasserstatistik – Ergebnisse und Methoden.....</b>	<b>51</b>
--	-----------

Melanie Bodenseh

## **Daten zur Wassernutzung in der Zukunft – Entwicklung von Szenarien**

<b>Szenarien zur Wassernutzung – projektspezifische Erfahrungen und Erkenntnisse.....</b>	<b>57</b>
---	-----------

Katharina Richter

<b>Öffentliche Wasserversorgung Berlin – Wasserversorgungskonzept 2040 .....</b>	<b>68</b>
--	-----------

Jens Burgschweiger

<b>Management und Nutzung von Wasserressourcen für die Landwirtschaft .....</b>	<b>75</b>
---	-----------

Jörg Steidl

## **Einführung in die Modellierung**

<b>Modellierung – Die Kunst bestmöglicher Interpolation zwischen und Extrapolation von Messdaten und Szenarien.....</b>	<b>84</b>
---	-----------

Thomas Maurer

<b>Wassermengenbewirtschaftung von Bundeswasserstraßen – Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung .....</b>	<b>93</b>
---	-----------

Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach

## **Bewirtschaftungsmodelle für Szenarienrechnungen**

<b>Ermittlung einer Bewirtschaftungsstrategie für den Mittellandkanal-West bei starkem Westwind.....</b>	<b>106</b>
--	------------

Peter Schmitt-Heiderich und Fabian Belzner

<b>Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals – Herausforderungen und Lösungsansätze .....</b>	<b>114</b>
---	------------

Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach

## **Bewirtschaftungsmodelle für den operationellen Betrieb**

<b>Simulationsverfahren zum optimierten Betrieb von Talsperren und Staustufen .....</b>	<b>130</b>
---	------------

Stephan Theobald, Alexander Rötze und Christian Bouillon

<b>Einfluss von Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauregelung am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen .....</b>	<b>139</b>
---	------------

Julia Kasper, Franz Simons, Fabian Belzner und Peter Schmitt-Heiderich

<b>Steuerungsmodell Jeetzel / Hitzacker.....</b>	<b>147</b>
--	------------

Joachim Steinrück

<b>Schlussbemerkungen.....</b>	<b>154</b>
--------------------------------	------------

Thomas Maurer

# Vorwort

Die Bundeswasserstraßen verbinden sehr unterschiedliche hydrologische Regionen Deutschlands miteinander. Sie sind teilweise frei fließend, aber häufig auch staugeregelte natürliche bzw. künstliche Gewässer, die mit ihrem Einzugsgebiet interagieren und in beträchtlichem Maß durch uns Menschen bewirtschaftet werden.

Die Bewirtschaftung wird notwendig, wenn das natürlich vorhandene Wasserdargebot in seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung nicht dem jeweiligen Wasserbedarf in Menge und Beschaffenheit entspricht. Da die Konstellationen dieser beiden Größen in Deutschland regional ganz verschieden sein können, fallen auch die Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Umverteilung des Wassers sektor- und regionsspezifisch unterschiedlich aus.

Vor diesem Hintergrund fand am 13./14. September 2016 in Koblenz das Kolloquium zur „Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen“ statt. Der Titel spiegelt den Schwerpunkt der Veranstaltung wider. Anspruch eines wissenschaftlichen Kolloquiums ist es aber auch, den Horizont zu weiten. Darum wurde neben der Vorstellung aktueller Fallbeispiele der Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen auch Wert darauf gelegt, den Blick über den Tellerrand zu richten. Experten aus anderen Sektoren (Trinkwasserversorgung, Wasserkraftgewinnung, Hochwasserrisiko-management, Bewässerung) und benachbarten Ländern (Österreich, Schweiz) wurden daher eingeladen, um ihre Probleme und Erfahrungen vorzustellen. Dies geschah mit dem Ziel, überregionalen oder sektorübergreifenden Gemeinsamkeiten nachzuspüren, die im besten Fall dazu inspirieren, hier und da die Übertragbarkeit der vorgestellten Lösungsansätze und Methoden auf andere Gebieten oder Handlungsfelder in Betracht zu ziehen.

Ein weiterer Anspruch dieses wissenschaftlichen Kolloquiums war die Vertiefung des System- und Prozessverständnisses und die Diskussion der Möglichkeiten und Grenzen der modelltechnischen Abbildung von Wasserbewirtschaftungssystemen. Zentral für die Erstellung von Modellen ist die umfassende Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten. Daraus resultiert die Grobgliederung sowohl des Kolloquiums als auch des vorliegenden Veranstaltungsbandes.

# Wasserkraft in Vorarlberg

Peter Matt

## 1 Wie alles begann...

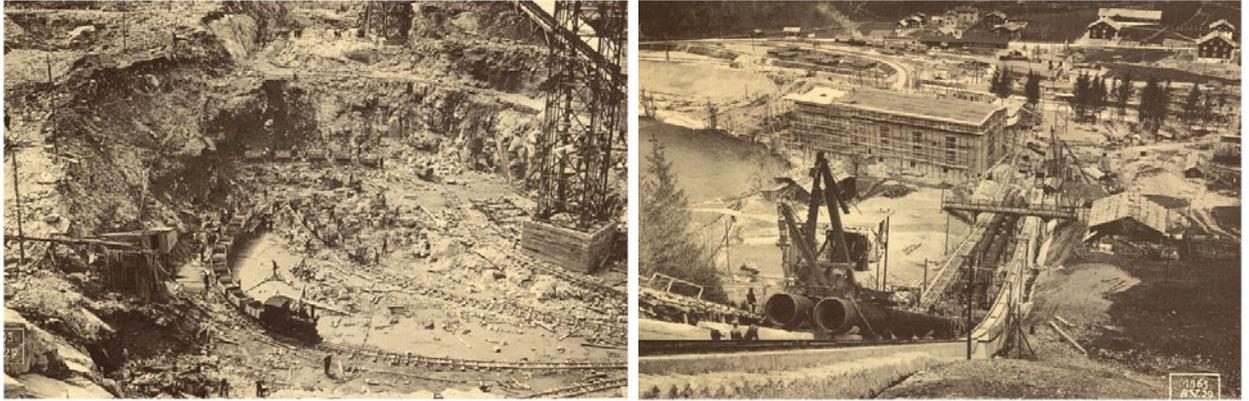
Das westlichste Bundesland Österreichs, im Dreiländereck Deutschland, Schweiz und Österreich war zu früherer Zeit rein agrarisch orientiert, Bodenschätze waren eher nur gering vorhanden. Erst durch den Bau von Transportwegen und den damit einsetzenden Handel kam es im 13. Jahrhundert zu Stadtgründungen. Im Feldkircher Stadtrecht wird im Besonderen der Tuchhandel, aber auch der Korn- und Weinhandel erwähnt, wobei in Bregenz der Schwerpunkt im Holzverarbeitenden Gewerbe lag. Die Wasserkraft nahm immer mehr an Bedeutung zu, um den Betrieb von Mühlen, Hammerwerken und Sägen zu sichern. Ab 1750 begann die Bauwollverarbeitung als Lohn- sowie Heimarbeit. Daraus entwickelten sich mechanische Fabriken wie Webereien, Stickereien, Färbereien, Bleichen, Druckereien, so dass bis 1830 kaum mehr geeignete Standorte im Hinblick auf den Maschinenantrieb „Wasserkraft“ übrig blieben. In Vorarlberg ist daher die Wasserkraft eng mit der Industrialisierung des Landes verbunden. (BLEYLE 2009)

## 2 Entwicklung der Vorarlberger Illwerke

In Vorarlberg erzeugten um die Jahrhundertwende eine Reihe von Industriebetrieben wie Schindler & Jenny, Bregenz 1882 und Gemeinden wie Schruns 1895 mit Hilfe der Wasserkraft elektrische Energie. Fachleute wiesen bereits damals darauf hin, dass der in Vorarlberg in großem Maße vorhandene Naturschatz Wasserkraft durch einen koordinierten Ausbau bestmöglich genutzt werden sollte. Die politisch Verantwortlichen im Lande, insbesondere der zuständige Referent für Energiewirtschaft in der Vorarlberger Landesregierung, Landesrat Dekan Barnabas Fink, ließen im Jahre 1917 sämtliche ausbaufähige Wasserkräfte erfassen und in einem Wasserkraftkataster verzeichnen. Mit der Unterzeichnung des Gesellschaftsvertrages der Vorarlberger Illwerke GmbH erfolgte deren Gründung. An der am 20. Dezember 1927 in eine Aktiengesellschaft umgewandelten „Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft“ waren die GROW AG (Großkraftwerk Württemberg AG), die OEW (Bezirksverband Oberschwäbische Elektrizitätswerke), das Land Württemberg, die WÜST AG (Württembergische Sammelschienen AG) und das Land Vorarlberg beteiligt. (Vorarlberger Illwerke 1989/1991)

Die Inbetriebnahme des bis dahin größten österreichischen Kraftwerkes erfolgte im Jahre 1930. Gleichzeitig wurde auch der Anschluss an die 220-kV-Rheinlandleitung, die in das rheinisch-westfälische Industriegebiet führte, errichtet. Ab 1931 übernahm das Vermuntwerk die Aufgaben der Frequenzhaltung für das internationale Höchstspannungsnetz im Verbund

mit Kohlekraftwerken in Deutschland. Damit war die alpine Wasserkraft mit den Kraftwerken im Ruhrgebiet verbunden – der europäische Verbundbetrieb begann. (Vorarlberger Illwerke 1989/1991)



**Abb. 1:** Vermuntwerk Bau von 1925 – 1930 (Quelle: Vorarlberger Illwerke AG)

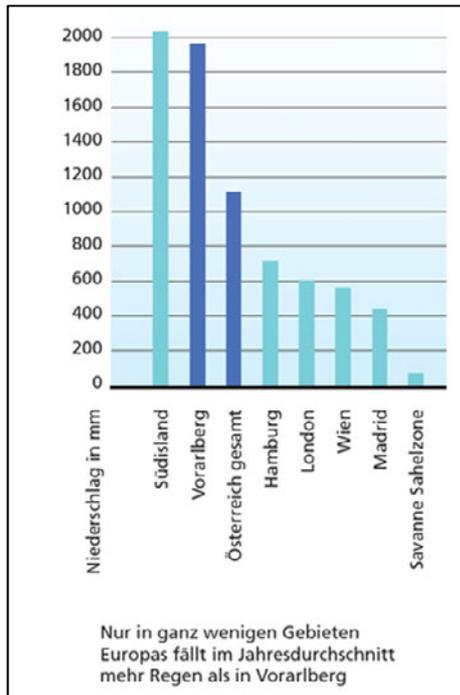


**Abb. 2:** Bau des Obervermuntwerkes II (Quelle: Vorarlberger Illwerke AG)

Mit dem Bau des Obervermuntwerkes II, welches speziell für Regel- und Spitzenenergie ausgestattet ist, wird neben dem bestehenden Kopswerk II eines der modernsten Pumpspeicherwerke im Alpenraum errichtet. Die Inbetriebnahme ist im Jahre 2018 geplant.

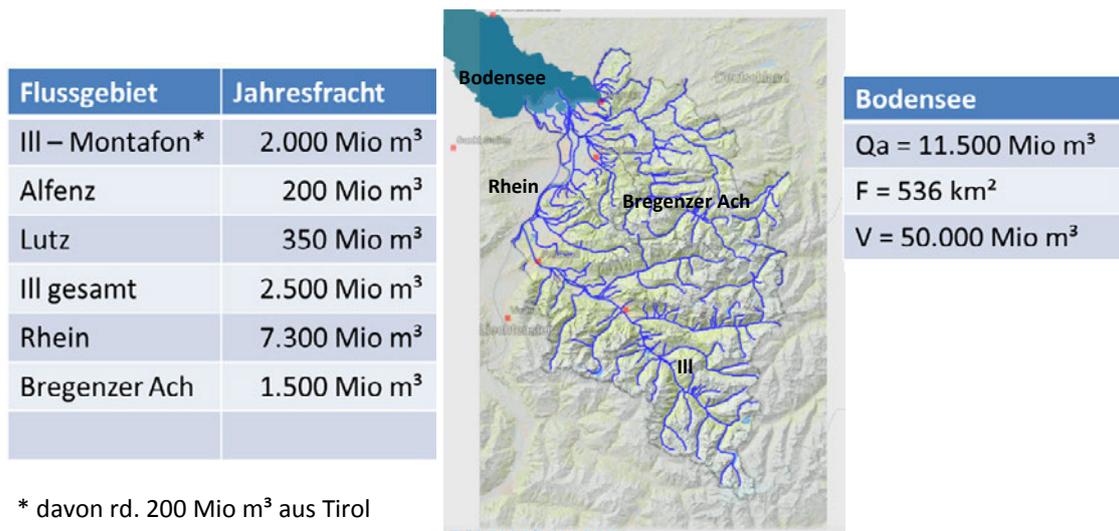
### 3 Wasserwirtschaft in Vorarlberg

Durch die frühe Wasserkraftnutzung begannen in Vorarlberg auch die Aufzeichnungen und die Erfahrungen zu dem vorhandenen Wasserdargebot. So konnten bereits schon früh entsprechende Ausbaupläne für die Wasserkraft auf Grundlage von wasserwirtschaftlichen Daten ausgearbeitet werden. Vorarlberg selbst liegt im Einflussbereich der feuchten Atlantikströmung die sich an den hohen Berggipfeln staut. Dadurch hat Vorarlberg Niederschlagshöhen von bis zu 3000 mm/Jahr zu verzeichnen (s. auch Abb. 3), die jedoch je nach Lage sehr unterschiedlich sein können.



Als Beispiel sei hier erwähnt, dass mit den Wassermassen der Ill im Jahre 1827 24.000 Spindeln betrieben wurden; alle übrigen Spinnereien im Lande besaßen zusammen nur 26.000 Spindeln (BLEYLE 2009). Daraus lässt sich schließen, dass das Ill-einzugsgebiet die besten Wasserkraftstandorte mit den höchsten Wasserfrachten aufweist (Abb. 4).

**Abb. 3:**  
Durchschnittliche Jahresniederschläge von Vorarlberg im Vergleich (Quelle: Klimaatlas Vorarlberg)



**Abb. 4:** Wasserfrachten im Illeinzugsgebiet



Zur Überwachung der Gewässer sowie für Prognosen werden in Vorarlberg eine Vielzahl von Fließgewässerpegeln, Grundwasserpegeln, Quellen, Wetterstationen, Totalisatoren, etc. beobachtet (Abb. 5).

**Abb.: 5:**  
Messstellen zur Gewässerüberwachung in Vorarlberg (Amt der Vorarlberger Landesregierung)

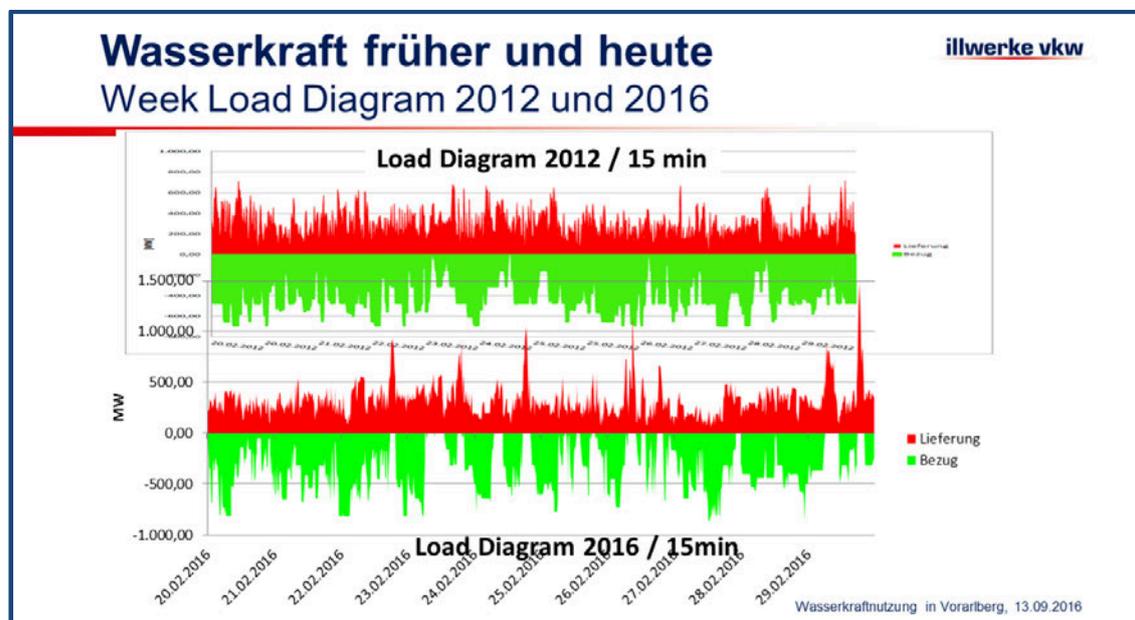
Eine Besonderheit ist in Vorarlberg auch der Umgang mit Energie. 2010 wurde ein einstimmiger Landtagsbeschluss zur Energieautonomie des Landes Vorarlberg gefällt. Damit wurde neben der Energie- und Wasserwirtschaftsstrategie u. a. auch festgelegt, dass ökologisch „sehr gute Gewässer“ bis zum Jahre 2030 für alle Eingriffe geschützt sind. Damit wurden die Leitlinien für den künftigen Wasserkraftausbau festgelegt.

## 4 Wasserkraft heute

### 4.1 Was kann die Wasserkraft?

Wurden vor der Energiewende die Kraftwerke so gesteuert, dass der erforderliche Strombedarf sichergestellt war, so kommt heute die 3. Dimension der wetterabhängigen Einspeisung der neuen erneuerbaren Energieträger wie Wind und Photovoltaik (PV) hinzu. Das Ziel der Energiewende soll die massive Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und somit die Erreichung der Energieziele sein. Bis heute wurden rd. 90.000 MW an erneuerbaren Energieträgern wie Wind und PV installiert, welche rd. 1/3 des gesamten Stromverbrauches bereits abdecken können. Entsprechend den Klimaschutzzielen sollen bis 2050 rd. 80 % erneuerbare Energieträger den Strombedarf abdecken können. Der Grundsatz, dass zu jedem Zeitpunkt exakt so viel Strom erzeugt werden muss, wie verbraucht wird, ist physikalisch fixiert. Bei zu wenig Strom im Netz müssen Kraftwerke mehr Strom erzeugen, bei zu viel Strom im Netz muss dieser „verbraucht“ bzw. durch große Pumpen aus dem Netz gezogen werden.

Eine Speicherung des Stroms ist bisher großindustriell nur über Pumpspeicherwerke wirtschaftlich sinnvoll gewesen; derzeit werden eine Vielzahl von Speichermöglichkeiten entwickelt wie Batterien, Power to Gas, Power to Heat etc., die derzeit noch im Forschungsstadium stecken.



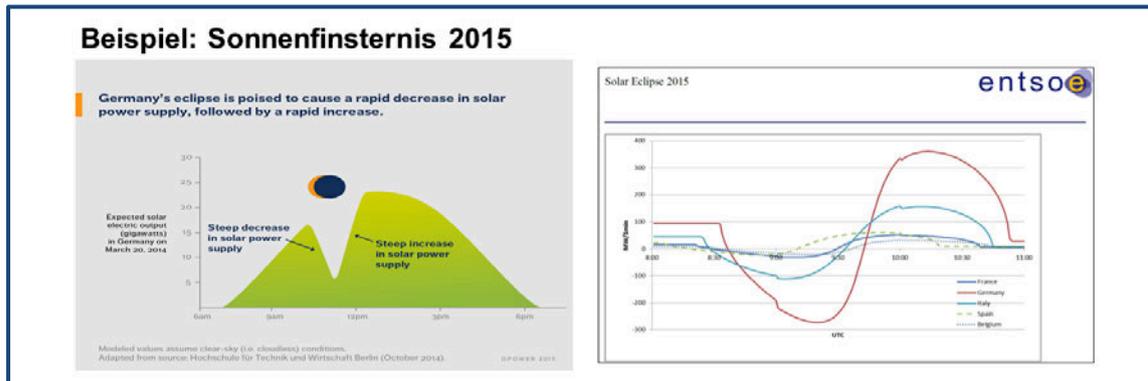
**Abb. 6:** Wasserkraftnutzung in Vorarlberg 2012 und 2016 (rot: Lieferung, grün: Bezug)

War vor der Energiewende das Hauptaugenmerk auf die optimierte Fahrweise und damit den optimierten Verbrauch von Brennstoffen für konventionelle Kraftwerke gerichtet, indem nachts überschüssiger Strom mittels Pumpspeicherwerken gespeichert wurde und am nächs-

ten Tag für Spitzenabdeckung wieder zur Verfügung stand, so liegt heute der Fokus auf dem raschen Ausgleich von wetterabhängiger Stromproduktion.

Je mehr erneuerbare Energieträger im Netz sind, umso höher wird die Volatilität im Netz (Abb. 6).

Das Beispiel der Sonnenfinsternis 2015 zeigte uns, dass innerhalb kurzer Zeit die PV-Anlagen zurückgefahren sind und nach Vorüberziehen des Mondes an der Sonne wieder massiv Strom produziert haben. Hierbei hat es Stromrampen im Netz von -250 MW/min bis über +300 MW/min gegeben (Abb. 7).

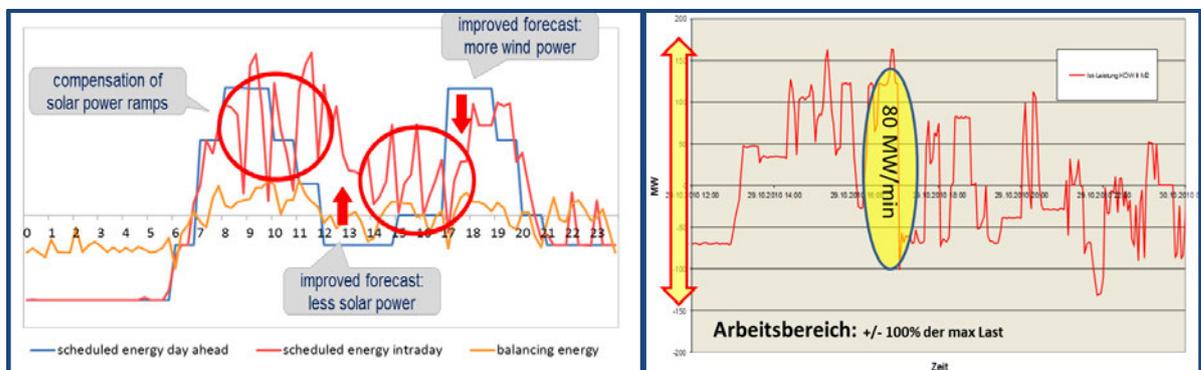


**Abb. 7:** Auswirkungen der Sonnenfinsternis 2015 auf die Stromproduktion der PV-Anlagen

Gleiches gilt auch für die Windkraft, die z. B. bei heranziehendem Sturm, um Schäden an den Anlagen zu vermeiden, abgestellt werden muss, welches wiederum zu raschen, massiven Einbrüchen in der Stromproduktion führt.

Zur Sicherung der Stromversorgung ist es daher unumgänglich, dass besonders rasch regelfähige, flexible Kraftwerke die erforderliche Residuallast (= Differenzlast zwischen Nachfrage und Stromerzeugung) bringen können. Die Vorarlberger Illwerke haben sich seit ihrem Bestehen auf Spitzen- und Regelernergie aus erneuerbarer Wasserkraft spezialisiert.

Die nachstehenden Diagramme zeigen den Einsatz eines Kraftwerkes im Laufe eines Tages zur Integration von Wind und PV. Im linken Bild ist der Verkauf der Leistung am Spotmarkt (day ahead, intraday) sowie am Regelerenergiemarkt zu sehen; im rechten Bild ist der Leistungsverlauf eines Maschinensatzes des Kopswerkes II zu sehen. Der 0-Durchgang bedeutet Umschaltung zwischen Turbine und Pumpe bzw. umgekehrt.

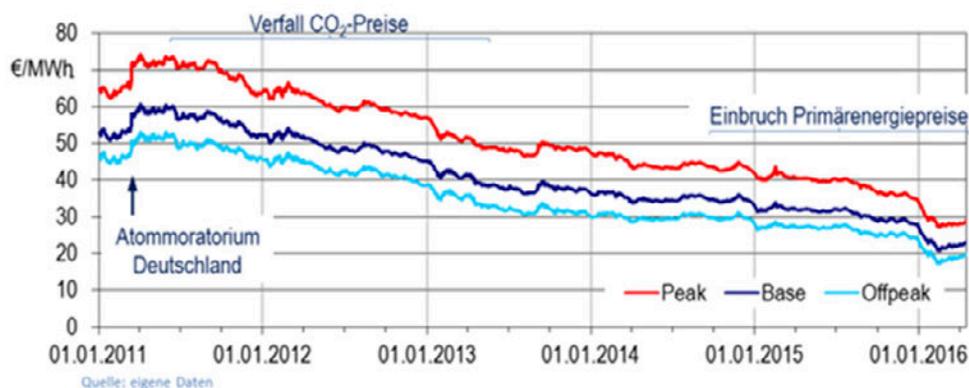


**Abb. 8:** Einsatz eines Kraftwerkes im Laufe eines Tages zur Integration von erneuerbaren Energien

## 4.2 Ist die Wasserkraft erneuerbar?

Um die Energiewende möglichst rasch zu beginnen und die gesetzten Ziele termingerecht zu erreichen, wurde das EE-Gesetz in Kraft gesetzt. Dieses Gesetz regelt die bevorzugte Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen und garantiert den Erzeugern feste Einspeisevergütungen. Die Gesamtsumme der Förderungen liegt derzeit bei über 20 Mrd. EUR, sie wird über den Strompreis z. B. für 2017 mit 6,88 ct/kWh umgelegt. Nachdem die Großwasserkraft bisher ohne Förderungen ausgekommen ist, wurden hauptsächlich Kleinanlagen bis 5 MW als erneuerbare Energieträger gefördert. Die Großwasserkraft muss sich im liberalisierten Markt, im Wettbewerb mit allen konventionellen Stromerzeugern, behaupten.

Aufgrund der fixen Einspeisetarifförderung, der bevorzugten Einspeisung von Erneuerbaren, der Einführung von Netznutzungsentgeld für Pumpstrom, der massiven Überkapazität von konventionellen Kraftwerken und dem Preisverfall der CO<sub>2</sub>-Zertifikate ist seit 2012 der Großhandelspreis für Erzeuger massiv gesunken. Mit Werten von 2 bis 3 ct/kWh (20 bis 30 EUR/MWh) z. B. für Wasserkraftbetreiber sind weder Investitionssignale noch Gewinnerwartungen bei vorhandenen Anlagen gegeben.



**Abb. 9:** Entwicklung der Energiepreise

Zusätzlich wurde zur Gewässersanierung noch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie verbindlich umgesetzt. Hierbei werden den Wasserkrafterzeugern teils überbordende Maßnahmen zur Gewässersanierung vorgeschrieben, ohne eine Abwägung zwischen ökologischem Benefit und Kosten der Maßnahmen durchzuführen. In Österreich wurden im Rahmen des nationalen Gewässermanagementplanes 2009 rd. 190 Mio EUR in Gewässersanierungsmaßnahmen investiert und Verluste von 160 GWh/a in Kauf genommen. Diese Verluste an Primärenergie müssen dann durch andere Erzeuger subsummiert werden, welches einem zusätzlichen Ausstoß von 160.000 t CO<sub>2</sub> (ca. 80.000 Mittelklasse-PKW bei einer Fahrleistung von 15.000 km/a) entspricht.

Die Wasserkraft ist derzeit eher mit dem Prädikat „umweltschädigend“ behaftet, da der Zielkonflikt Gewässersanierung vs. Klimaschutz nicht mit auf die Waagschale gelegt wird. Nachstehendes Diagramm (Fraunhofer ISE 2017) zeigt, dass gerade die erneuerbare, flexible Wasserkraft im Stande ist, den erforderlichen Ausgleich zur Integration der anderen erneuerbaren Energieträger zu schaffen und damit einen wertvollen Beitrag zur Reduktion von CO<sub>2</sub> zu leisten.

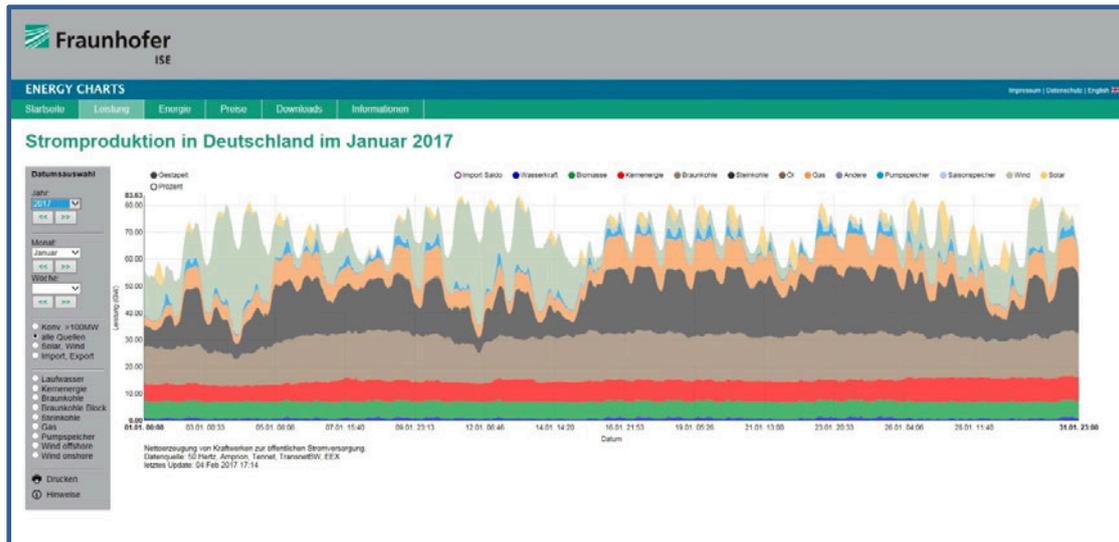


Abb. 10: Stromproduktion in Deutschland im Januar 2017 (Fraunhofer ISE 2017)

### 4.3 Spitzenstrom und Regelleistung bei der Vorarlberger Illwerke AG

Turbinenleistung:	1800 MW
Pumpleistung:	1040 MW
Nach Betrieb OVW II:	
Turbinenleistung:	2240 MW
Pumpleistung:	1400 MW

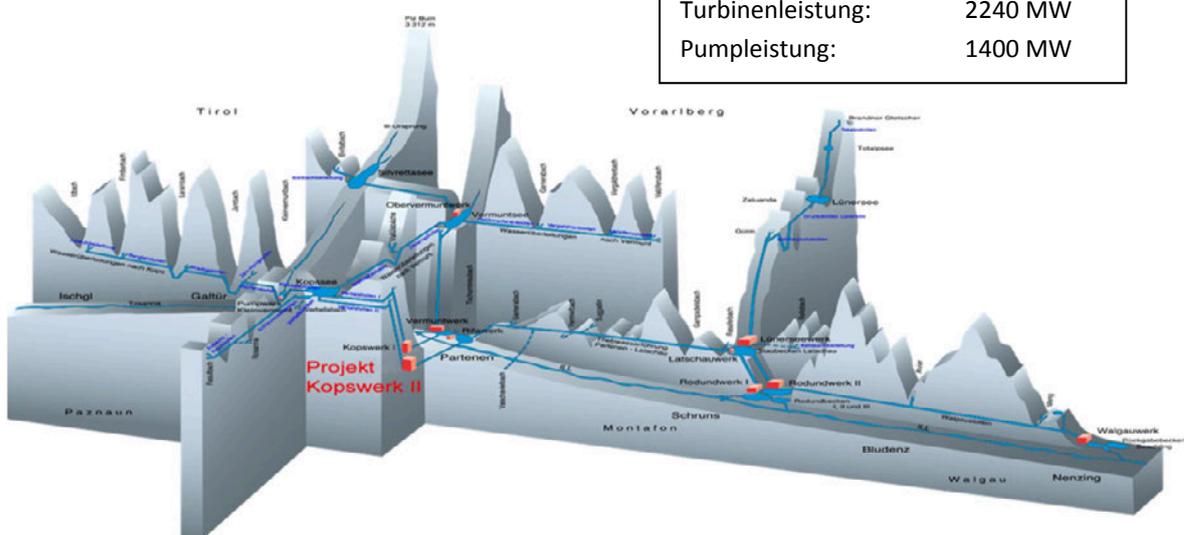


Abb. 11: Spitzenstrom und Regelleistung bei der Vorarlberger Illwerke AG

Derzeit wird zwischen dem Silvrettaspeicher auf 2000 m Höhe und dem Vermuntspesicher auf 1700 m Höhe das Obervermuntwerk II als neues Pumpspeicherwerk errichtet (Abb. 12). Die Gesamtleistung dieses Werkes wird bei +360 und -360 MW liegen. Nach Fertigstellung dieses Werkes kann die Vorarlberger Illwerke AG den Süden von Deutschland mit flexibler Regelleistung von +2.200 bis -1.400 MW versorgen und ist damit fit für die künftigen Herausforderungen der Energiewende.

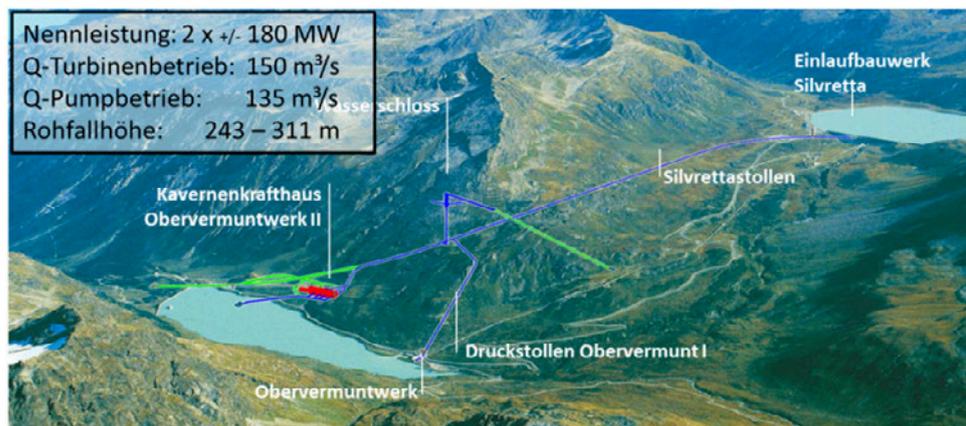


Abb. 12: Das Projekt Obervermuntwerk II

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die alpine Wasserkraft mit den flexiblen Anlagen und den großen Speichermöglichkeiten in den hochgelegenen Stauseen war bisher schon die „Feuerwehr“ zur Sicherung der Stromversorgung.

Basis für die künftige alpine Wasserkraft müssen gleiche Wettbewerbsbedingungen für alle erneuerbaren Energieträger sein.

Unter dem Aspekt erneuerbare Ausregelung von erneuerbaren Energieträgern stellt die alpine Wasserkraft das Herz der erneuerbaren Stromerzeugerfamilie dar. Sie ist ein Garant dafür, jederzeit und rasch die erforderliche Leistung zur Verfügung zu stellen. Die alpine Wasserkraft kann damit die sichere, nachhaltige Stromversorgung und Stabilität des Versorgungssystems gewährleisten und bildet eine der Grundlagen für ein nachhaltiges Europa.

## Literatur

BLEYLE, A. (2009): Entstehung und Entwicklung der Vorarlberger Industrie. Aufsätze zur Wirtschaftsgeschichte Vorarlbergs. <http://www.wirtschaftsarchiv-v.at/wirtschaftsgeschichte.htm> (letzter Zugriff 03.03.2017)

Vorarlberger Illwerke AG (1989/1991): Imagebroschüre

Amt der Vorarlberger Landesregierung: [www.vorarlberg.at/wasserwirtschaft](http://www.vorarlberg.at/wasserwirtschaft) (letzter Zugriff 03.03.2017)

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2017): Energy charts. [https://www.energy-charts.de/power\\_de.htm](https://www.energy-charts.de/power_de.htm) (letzter Zugriff 03.03.2017)

### Kontakt:

**Dipl.-Ing. Peter Matt**

Vorarlberger Illwerke AG

Anton-Ammann-Straße 12, 6773 Vandans

Österreich

Tel.: 0043 5556 701 86281

E-Mail: [peter.matt@illwerke.at](mailto:peter.matt@illwerke.at)

# Trinkwasserversorgungssystem Wien

Paul Hellmeier

Das Wiener Wasser kommt aus den nahen Bergen südwestlich der Hauptstadt. Zwei Hochquellenleitungen versorgen die rund 1,8 Millionen Einwohnerinnen und Einwohner Wiens seit mehr als 140 Jahren mit bestem Bergquellwasser und garantieren höchste Trinkwasserqualität. Der verantwortungsvolle Umgang mit den natürlichen Ressourcen und die Sicherung der hohen Qualität sind die Prioritäten bei der Wasserversorgung.

## 1 Wasseraufbringung

Das Geheimnis der Wiener Wasserqualität liegt in den südwestlich von Wien gelegenen Bergen. Aus den gut geschützten Gebieten am Hochschwab sowie von Rax, Schneeberg und Schneealpe leiten zwei Hochquellenleitungen seit mehr als 140 Jahren das kostbare Nass nach Wien (Abb. 1).



Abb. 1: Wassergewinnung und -transport für Wien (Grafik: Wiener Wasser)

Durch das natürliche Gefälle ist keine Pumpenenergie erforderlich. Reinstes Trinkwasser wird von der Wiener Bevölkerung sehr geschätzt und trägt dazu bei, dass die Stadt Wien laut Mercer-Studie weltweit die Stadt mit der höchsten Lebensqualität ist.

Der Grund für die hohe Trinkwasserqualität liegt in der unberührten Natur der Quellgebiete. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Stadt Wien sorgen dafür, dass der Quellschutz im Mittelpunkt steht und alle anderen Nutzungen wie z. B. Holzertrag, Tourismus, etc. darauf abgestimmt sind.



**Abb. 2:** Quellschutzgebiet im Sommer und Winter, Ursprung der Wasserversorgung Wiens  
(Fotos: Wiener Wasser, Riha)

Der Niederschlag, die Oberfläche, das Innere des Berges und die Zeit prägen die Wasserqualität. Der ausgezeichnete, erfrischende Geschmack des Wiener Wassers liegt dabei einerseits in der niedrigen Temperatur, andererseits im hohen Sauerstoffgehalt. Das Wasser hat in der Quelle eine Temperatur von 6-7°C. Auf dem Weg nach Wien bis zur Einleitung in das Rohrnetz erwärmt es sich um 1°C.

## 1.1 Geschichte

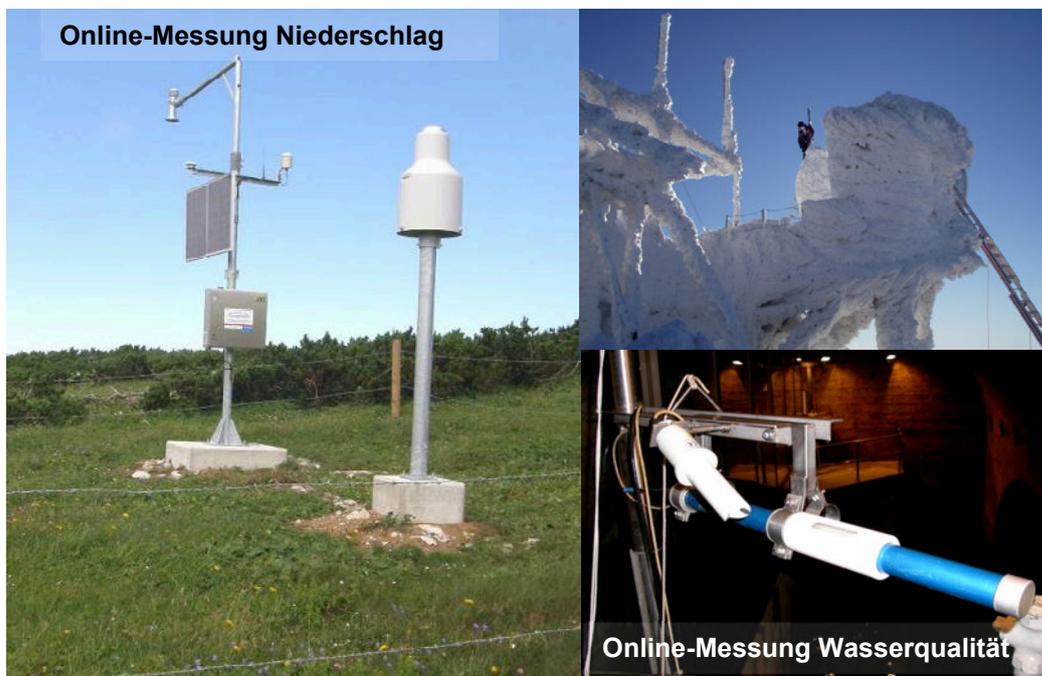
Die bis heute bestehenden Hochquellenleitungen stammen aus dem 19. und beginnenden 20. Jahrhundert. Die I. Hochquellenleitung wurde infolge einer Wasserknappheit und der schlechten Qualität des Brunnenwassers geplant und nach nur drei Jahren Bauzeit 1873 eröffnet. Sie befreite die Wienerinnen und Wiener von Wassernot und sich ausbreitenden Typhus-/Choleraepidemien, denn mit einem Schlag waren 90 % der damals bewohnten Gebiete an die Wasserleitung angeschlossen. Die rasante Ausbreitung der Stadt und die Eingemeindung der Vororte in den Jahren 1890 bis 1892 erforderten allerdings den raschen Ausbau des vorhandenen Versorgungssystems.

So wurde im Jahr 1900 der Grundstein für die II. Hochquellenleitung gelegt. 10.000 Arbeiterinnen und Arbeiter waren zehn Jahre lang mit dem Bau der etwa 180 km langen Leitung vom Hochschwabgebiet bis Wien beschäftigt. Die durch Kaiser Franz Joseph I. am 2. Dezember 1910 eröffnete II. Hochquellenleitung hatte ebenfalls einen positiven Einfluss auf die Volksgesundheit. Mit der gesicherten Frischwasserversorgung konnten in allen Bezirken Wiens Brause- und Volksfreibäder errichtet werden.

Im Normalbetrieb wird ganz Wien mit Quellwasser versorgt. Lediglich bei Wartungsarbeiten an einer der beiden Hochquellenleitungen wird eine geringe Menge Grundwasser beigegeben. Die Stadt Wien speichert in 32 Wasserbehältern eine ständige Reserve von 1,6 Millionen Kubikmetern.

## 1.2 Wasserqualitätsmanagement

Um ein Optimum in puncto Wasserqualität zu erreichen, besteht ein komplexes System aus online übertragenden Wetterstationen, um eventuelle Einflüsse aus Starkregenereignissen vorhersagen zu können. Dieses Messnetz wird ergänzt durch ebenfalls online übertragende Wasserqualitätssonden in jeder einzelnen Quellstube. Auf Basis dieser umfangreichen Datengrundlage werden die jeweils verfügbaren besten Wässer nach Wien weitergeleitet.



**Abb. 3:** Online-Wetterstationen und -Wasserqualitätssonden  
(Fotos: Wiener Wasser, Archiv)

## 2 Zahlen, Daten, Fakten

- > Verbrauch durchschnittlich: 370.000 bis 380.000 m<sup>3</sup>/d  
(entspricht 4,31 m<sup>3</sup>/s, einem Quader in der Größe eines Fußballfeldes mit 47 m Höhe)
- > 70 Wasser- und Quellfassungen (Quellgebiete), s. auch Abb. 4;  
20 Wasserfassungen (Wien)
- > Größe der Wasserschongebiete im Quellengebiet 675 km<sup>2</sup>, Eigengrund 335 km<sup>2</sup>  
(Fläche von Wien = 415 km<sup>2</sup>)
- > 330 km Hochquellenleitungen bis Wien (Stollen 82 km), 130 Aquädukte (s. auch  
Abb. 5), 19 Düker (Talquerungen, Länge zw. 90 m bis 1.600 m)
- > 15 Trinkwasser-Kraftwerke, Stromproduktion: 65 Mio. kWh/a
- > 32 Wasserbehälter (größter mit 600.000 m<sup>3</sup>), s. auch Abb. 6,  
gesamtes Behältervolumen: 1,6 Mio. m<sup>3</sup>
- > 25 Pumpwerke
- > 3.000 km Rohrnetz in Wien, 800 km Anschlussleitungen bis Wasserzähler,  
12.000 Hydranten

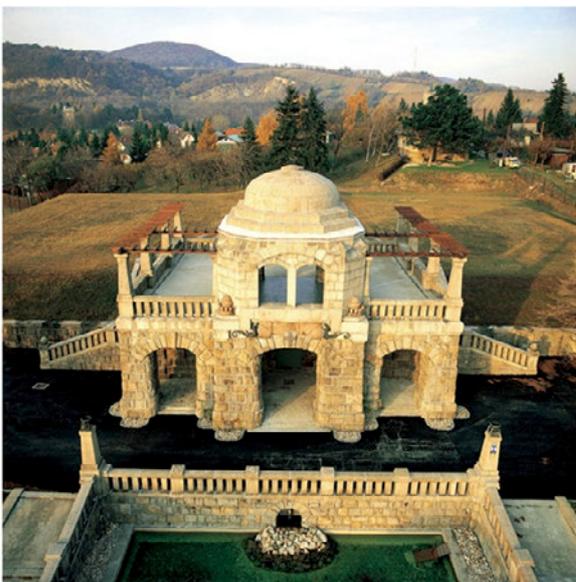
- > 900 Trinkbrunnen entlang von Straßen und Gehsteigen  
58 Monumental- und Denkmalbrunnen
- > Wasserpreis: seit 1.1.2014 EUR 1,80 pro m<sup>3</sup> => 89 Euro/(Pers\*a)



**Abb. 4:**  
Quellstube (Foto: Wiener Wasser, Houdek)



**Abb. 5:**  
Aquädukt an der I. Hochquellenleitung  
(Foto: Wiener Wasser, Riha)



**Abb. 6:**  
Wasserbehälter „Hackenberg“ in Wien  
(Foto: Wiener Wasser, Riha)

### 3 Wasserverteilung

Von den Endpunkten der Hochquellenleitungen wird das Wasser über Hochbehälter in das Rohrnetz eingespeist. So gelangt es in die Wohnungen und Häuser. Das Netz umfasst mehr als 3.000 km öffentliche Rohrstränge und über 102.500 Anschlussleitungen.

Das Rohrnetz ist in verschiedene Druckzonen unterteilt. Diese ergeben sich durch verschiedene Höhenlagen der Versorgungsgebiete (vgl. Abb. 7). Von der I. Hochquellenleitung werden die tiefer gelegenen Gebiete (blau, violett) versorgt. Die II. Hochquellenleitung versorgt die höher gelegenen Bereiche (rot, grün, orange, braun und gelb) im Westen Wiens. In allen Druckzonen liegt der Wasserdruck bei 3-5 bar.

Durch Bau- und laufende Überwachungsmaßnahmen arbeitet Wiener Wasser daran, die Rohrnetzverluste gering zu halten. Durch Wasser sparende Armaturen und Haushaltsgeräte ist der tägliche Wasserbedarf im Haushalt pro Person gesunken. Darüber hinaus hat sich ein neues Bewusstsein im Verbrauchsverhalten entwickelt.

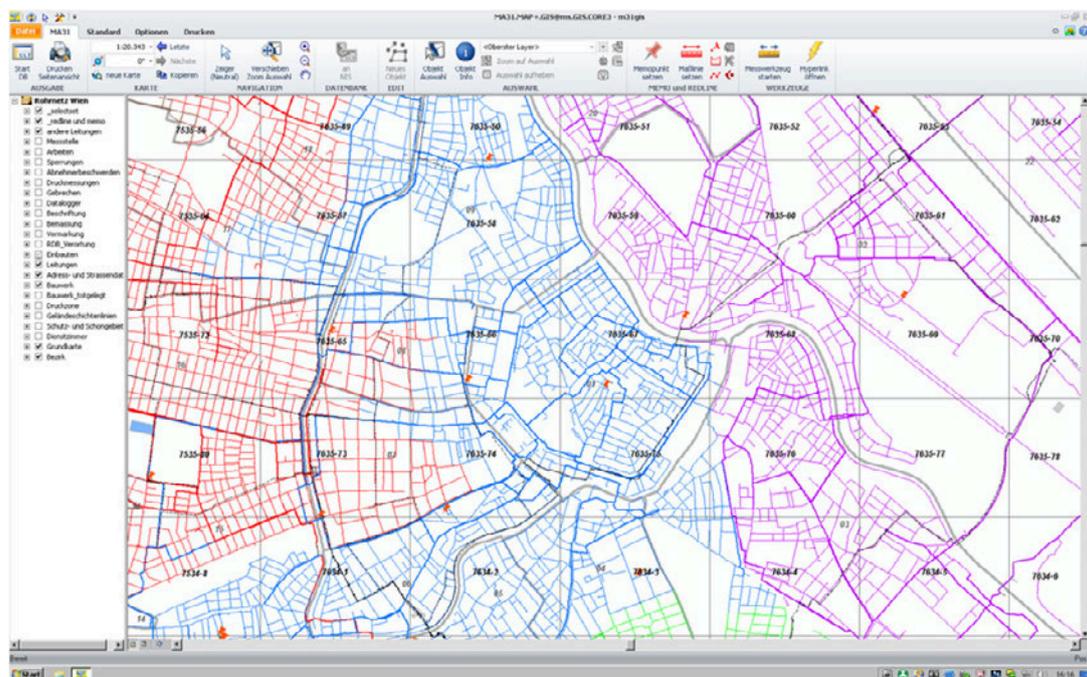


Abb. 7: Netzinformationssystem (NIS), (Grafik: Wiener Wasser)

Bei der Pflege und beim Ausbau des Wiener Wasserrohrnetzes werden notwendige Maßnahmen und Investitionen sorgfältig geplant und umgesetzt. Das Sechs-Säulen-Programm hilft, den Zustand der Rohre exakter zu überwachen, mögliche Risikofaktoren abzuschätzen sowie den Erneuerungszeitpunkt zu optimieren.

#### Säule 1 – Netzinformationssystem (NIS)

Das Netzinformationssystem (NIS) ist die Basis für die Wiener Wasserrohrnetz-Offensive. Es verwaltet exakte Pläne mit Lage, Durchmesser, Material, Druckzone, Baujahr und dem technischen Zustand aller verlegten Rohre. Der Zustand und die Nutzungsdauer eines Rohres hängen allerdings nicht nur vom Material selbst ab, sondern von unterschiedlichsten Einflüssen wie etwa Verkehrsbelastungen. Deren Auswirkungen müssen jedes Mal individuell untersucht und festgestellt werden.

## **Säule 2 – Früherkennung durch laufende Überwachung**

Gezielte „Lauschangriffe“ auf die Rohre zur akustischen Überprüfung auf sogenannte Austrittsgeräusche gewährleisten, dass Rohrschäden frühzeitig erkannt und behoben werden können. Im Zuge der Wiener Wasserrohrnetz-Offensive werden Geräusch- und Mengenüberwachungssysteme im Stadtgebiet verstärkt eingesetzt (Abb. 8).



**Abb. 8:** Geräuschlogger zur Leckortung (Foto: Wiener Wasser)

## **Säule 3 – Pipe Rehabilitation Management (PiRem)**

Das Pipe Rehabilitation Management (PiRem) ist ein EDV-Tool am neuesten Stand der Technik. Es macht anhand eines mathematischen Modells die Einflüsse sichtbar, die die Alterung beziehungsweise typische Schäden der Rohre beeinflussen. Damit können drohende Rohrdefekte rechtzeitig erkannt werden. Das PiRem ist entscheidend für eine gezielte Planung der Investitionen in das Wiener Wasserrohrnetz.

## **Säule 4 – Forcierung grabenloser Bautechniken (NoDig-Verfahren)**

Der Einsatz der jungen, aber bewährten Technologie des NoDig-Verfahrens stellt einen wichtigen Punkt in der Wiener Wasserrohrnetz-Offensive dar. Diese Bautechnik vermindert den Grabungs- und Zeitaufwand und damit den Einsatz von natürlichen Ressourcen und den Baustellenverkehr.

## **Säule 5 – Synergieeffekte durch akkordierte Baumaßnahmen**

Diese Säule beruht auf ständiger Kommunikation und laufendem Informationsaustausch mit unterschiedlichen Baurägern, wie zum Beispiel *Wien Netze* und *Wien Kanal*. Das spart Geld, verkürzt die Baustellendauer und verringert die negativen Auswirkungen auf Umwelt und Verkehrsfluss.

## **Säule 6 – Prioritätenreihung nach Hauptverkehrsstraßen**

Erschütterungen durch den Verkehr sind ein häufiger Auslöser von frühzeitigen Rohrschäden. Daher werden wichtige Wasserverbindungen unter viel befahrenen Straßen genauestens überprüft.

## **4 Wasserbedarf und -prognose**

Der Planung von Wasserversorgungsanlagen werden üblicher Weise Zeiträume von 30 bis 50 Jahren zugrunde gelegt. Dies gilt sowohl für die technische Planung (Auslegung Rohrnetz, Behältervolumen) als auch für die wirtschaftliche Betrachtung und Investitionsplanung.

Deshalb sind neben der Kenntnis des aktuellen Wasserverbrauchs auch dessen Entwicklung bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt sowie das Wissen über die maßgeblichen, die zukünftige Entwicklung beeinflussenden, Faktoren von großer Bedeutung.

Eine genaue Prognose des zukünftigen Wasserverbrauchs ist unerlässlich, um diesbezüglich geeignete Strategien vorausschauend entwickeln zu können.

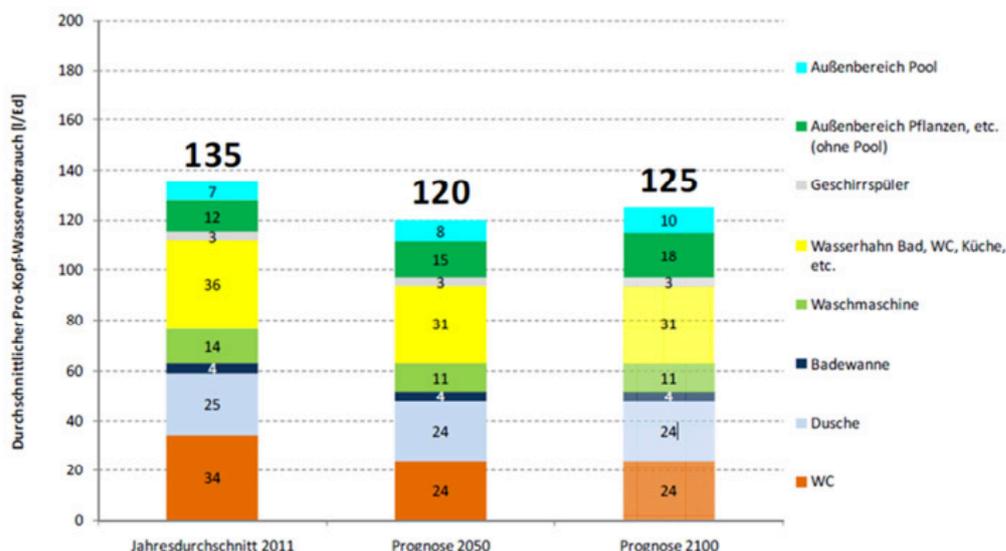
Nachfolgende Grafiken beschreiben die zukünftige Entwicklung des Wasserverbrauchs auf Basis der bisherigen Entwicklung sowie unter Berücksichtigung aktueller Studien zur zukünftigen Entwicklung von maßgeblichen Einflussfaktoren. Die Genauigkeit der Prognose bzw. die Unsicherheiten und die sich dadurch ergebende Schwankungsbreite werden ebenfalls thematisiert.

#### 4.1 Prognose Haushaltsverbrauch

Die Entwicklung des spezifischen Haushaltsverbrauches in Österreich wurde im Zuge der Studie Wasserverbrauch und Wasserbedarf – Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch (NEUNTEUFEL et al. 2012) detailliert untersucht. Dabei wurden die sozioökonomischen Entwicklungen bis 2050 berücksichtigt.

Die Gesamtbedarfskomponente Haushaltsverbrauch von Wien wird aus dem spezifischen (pro Kopf) Verbrauch und der Bevölkerungszahl errechnet.

In der Studie (NEUNTEUFEL et al. 2012) ist bei der Prognose der Entwicklung des spezifischen Haushaltsverbrauchs bis 2100 weiters die Entwicklung des Außenverbrauchs aufgrund des Klimawandels mit einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur um 4°C berücksichtigt. Eine derart weit in die Zukunft blickende Prognose ist mit großen Unsicherheiten behaftet, weshalb die Auswirkungen auf die Wasserversorgung Wiens nur bis ins Jahr 2030 (Ausblick 2050) betrachtet werden.

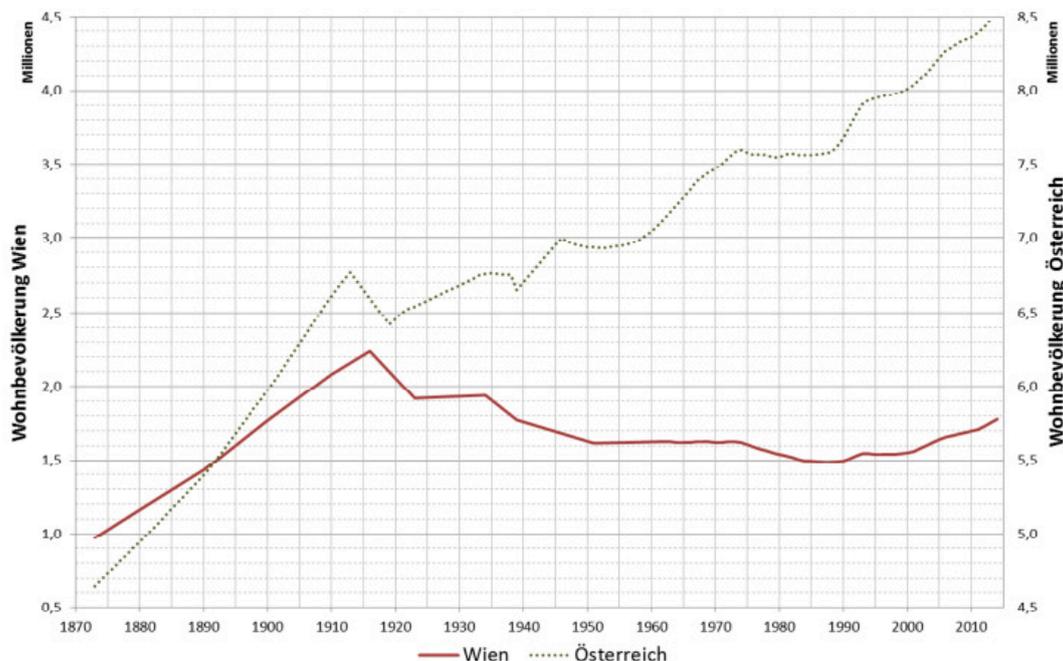


**Abb. 9:** Durchschnittlicher Pro-Kopf-Wasserverbrauch (l/E d) in Österreich (Grafik: Wiener Wasserverbrauch Prognose 2030)

Den häuslichen Pro-Kopf-Verbrauch Österreichs und seine prognostizierte Entwicklung zeigt Abb. 9. Die Abnahme von 135 auf 120 l/E d entspricht ca. 11 % in 40 Jahren bzw. knapp 0,3 % pro Jahr. In gegenständlicher Prognose der erforderlichen Abgabemenge ins Rohrnetz Wien wurde von einer linearen Entwicklung des spezifischen Haushaltsverbrauchs von 2010 bis 2050 ausgegangen.

## 4.2 Bevölkerungsentwicklung

Abbildung 10 zeigt die Bevölkerungsentwicklung in Wien seit den 1870er-Jahren im Vergleich zur Entwicklung in Österreich. Das Bevölkerungsmaximum in Wien wurde zwischen 1910 und 1920 mit über 2,1 Mio. Einwohnern erreicht. Danach erfolgte ein Rückgang bis in die 1980er-Jahre auf unter 1,5 Mio. Einwohner. Seither steigt Wiens Bevölkerung wieder an, seit dem Jahr 2000 relativ stetig um im Mittel etwa 1 % pro Jahr.



**Abb. 10:** Bevölkerungsentwicklung in Wien und Österreich im Vergleich  
(Grafik: Wiener Wasserverbrauch Prognose 2030)

## 4.3 Prognose bis 2050

Abbildung 11 zeigt neben der Bevölkerungsentwicklung und -prognose gemäß der Studie „WIEN WÄCHST...“ (Magistrat der Stadt Wien 2014) die Entwicklung des Wiener Wasserverbrauchs (Abgabe ins Rohrnetz Wien) seit 1960 sowie die prognostizierten Werte bis 2050. Der breite blaue Streifen deutet die zwischen den Jahren zu erwartenden Verbrauchsschwankungen an, die vor allem witterungsbedingt sind. Mit ihnen ist unabhängig vom Gesamttrend zu rechnen.

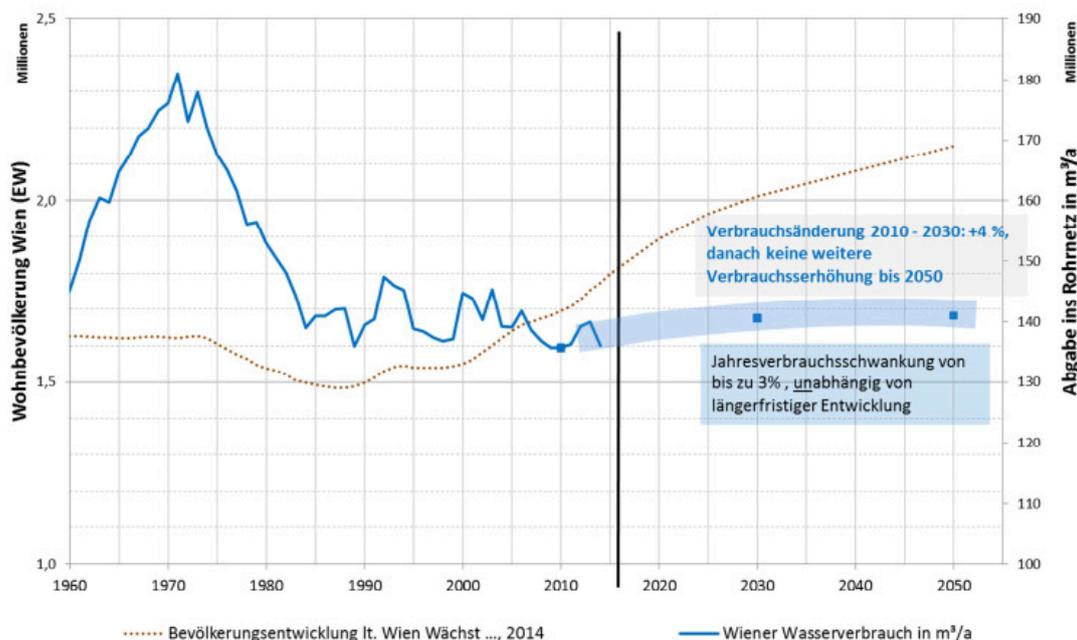
Die tatsächliche Entwicklung der ins Rohrnetz Wien eingeleiteten Wassermenge weist über mehrere Jahre gesehen seit dem Jahr 2000 einen tendenziell leicht fallenden Trend auf. Dieser Trend ist von jährlichen Verbrauchsschwankungen überlagert.

Für den Zeitraum 2010 bis 2013 ist beispielweise eine Verbrauchssteigerung erkennbar, im Jahr 2014 sank der Verbrauch jedoch wieder deutlich. Welchen Anteil bei solchen Verbrauchsänderungen z. B. witterungsbedingte Schwankungen haben, bzw. ob es sich um den Beginn einer Trendänderung handelt, kann nicht mit Sicherheit festgestellt werden.

Das Ergebnis der errechneten Verbrauchsentwicklung bis 2030 kann als leichte Umkehr des mittelfristigen Trends einer leichten Reduktion des Wiener Wasserverbrauchs seit dem Jahr 2000 interpretiert werden. Der deutliche andauernde Bevölkerungsanstieg wiegt demnach sowohl den Rückgang des spezifischen Haushaltsverbrauchs als auch den Rückgang des

Sonstigen Verbrauchs (Gewerbe, Betriebe, Tourismus) mehr als auf. Das verursacht einen moderaten Zuwachs des prognostizierten Gesamtbedarfs von ca. 4 % zwischen 2010 und 2030.

Im Zeitraum von 2030 bis 2050 nimmt die Bevölkerungszahl deutlich weniger stark zu und wird unter den getätigten Annahmen durch den sinkenden spezifischen Haushaltsverbrauch und die Reduktion des Sonstigen Verbrauchs quasi vollständig aufgewogen. Der Gesamtverbrauch 2030 bis 2050 bleibt in etwa gleich.



**Abb. 11:** Wiener Wasserverbrauch seit 1960 und Prognose  
(Grafik: Wiener Wasserverbrauch Prognose 2030)

## Literatur

Magistrat der Stadt Wien (Hrsg.) (2014): WIEN WÄCHST... Bevölkerungsentwicklung in Wien und den 23 Gemeinde- und 250 Zählbezirken. MA 23 – Wirtschaft, Arbeit und Statistik. Statistik Journal Wien 1/2014

NEUNTEUFEL, R., L. RICHARD, R. PERFLER, S. TUSCHEL, K. BÖHM, E. HAAS (2012): Wasserverbrauch und Wasserbedarf - Auswertung empirische Daten zum Wasserverbrauch. Herausgeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Jänner 2012, 252 S.

### Kontakt:

#### Dipl.-Ing. Paul Hellmeier

Wiener Wasser (MA 31), Fachbereich technische Infrastruktur, Behälter und Hebewerke

Grabnergasse 4-6, 1060 Wien, Österreich

Tel.: 0043 1 59 959 31515

E-Mail: paul.hellmeier@wien.gv.at

# Wie bringen wir Modelldaten und Wasserwirtschaftspraxis zusammen?

## Beispiel Wasserknappheitskarten in der Schweiz

Samuel Zahner

### 1 Einleitung

Als Alpenland ist die Schweiz gesegnet mit großen Wasservorkommen. Zu wenig Wasser war in der Schweiz bis vor einigen Jahren kaum ein Thema. Der Hitzesommer 2003 und weitere Ereignisse haben aber angedeutet, was die Forschung für die Zukunft voraussagt: Auch in der Schweiz wird es lokal und regional häufiger und verstärkt zu Wasserknappheitssituationen kommen (LANZ et al. 2014, BAFU 2012a, BAFU 2012b). Neben dem Klimawandel erhöhen auch sozioökonomische Faktoren den Druck auf die Ressource Wasser (LANZ et al. 2014, GDI 2016). In der Schweiz sind jedoch noch sehr wenige Erfahrungen mit knappheitsbedingtem Wassermanagement (Wasserressourcenmanagement) vorhanden. In drei aufeinander abgestützten Strategien des Schweizerischen Bundesrates und des Bundesamts für Umwelt (BAFU) wurden darum die Stoßrichtungen zum Umgang mit diesen Situationen festgelegt (BAFU 2012a, 2012c, 2014a, 2014b). Die Probleme unterscheiden sich in den kleinräumigen Strukturen der Schweizer Wasserwirtschaft recht stark. Es werden darum neue Ansätze gefordert, welche sich in die kleinräumigen Strukturen integrieren lassen und diesen neuen Herausforderungen gerecht werden.

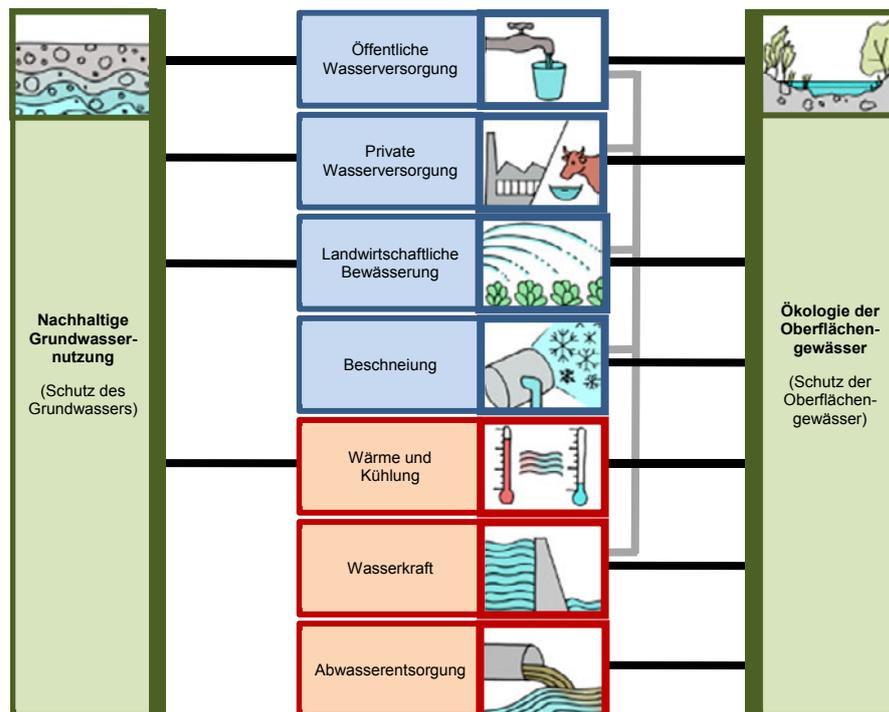
Zu diesem Zweck wurden die Praxisgrundlagen Wasserressourcenmanagement<sup>1</sup> in drei Modulen entwickelt. Das erste Modul ist eine Praxisanleitung (CHAIX et al. 2016) für eine kantonale (falls notwendig überkantonale) Situationsanalyse, bei welcher als Synthese eine Wasserknappheits(hinweis)karte resultiert. Für die vertiefte Anwendung der Methode sind Modelldaten aus verschiedensten Wasserdargebots- und Wasserbedarfsmodellierungen notwendig. Der Artikel wirft darum hinsichtlich der Praxisanleitung relevante Fragestellungen für Modellierungen auf und diskutiert, wie Modelldaten ausgestaltet werden sollen, damit sie in der Praxis angewendet werden können.

---

<sup>1</sup> <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/massnahmen-zum-schutz-der-gewaesser/uebergeordnete-instrumente/wasserressourcenmanagement.html> (letzter Zugriff 2.5.2017)

## 2 Systemabgrenzung Wasserknappheitsprobleme

Die häufigsten Problemfelder bezüglich Wasserknappheit sind in Abb. 1 illustriert. Als wichtige Randbedingungen sind die Schutzansprüche an das Grundwasser und an die Oberflächengewässer dargestellt. In der Mitte zeigt Abb. 1 die verschiedenen Nutzungsansprüche, in blauen Kästchen die konsumtiven Nutzungen, in roter Farbe die nicht konsumtiven Nutzungen. Als konsumtive (oder auch verbrauchende) Wassernutzungen werden diejenigen Nutzungen bezeichnet, bei welchen das Wasser innerhalb des betrachteten Systems (in diesem Fall ein Bilanzierungsraum) über einen längeren Zeitraum nicht wieder ins Gewässer zurückgegeben wird (CHAIX et al. 2016).



**Abb. 1:** Häufigste Problemfelder bezüglich Wasserknappheit  
(Quelle CHAIX et al. 2016, bearbeitet)

Wasserknappheitsprobleme zeigen sich nun als Konflikte oder räumliche Überlagerung dieser Ansprüche an die Ressource Wasser oder an den Raum. Typische Probleme sind Schutz- und Nutzungskonflikte, welche als Linien schematisch zwischen den grünen und blauen/roten Kästchen eingezeichnet sind. Solche entstehen beispielsweise bei der landwirtschaftlichen Bewässerung und dem Gewässerschutz oder bei Wasserentnahmen für die Beschneigung oder die Energieproduktion. Es können aber auch Konflikte zwischen Nutzungen auftreten (graue Linien), wie dies beispielsweise bei der Beschneigung aus den öffentlichen Wasserversorgungssystemen der Fall ist. Im Falle der Wasserversorgung dominieren in der Schweiz die Raumkonflikte rund um den Grundwasserschutz. Grundwasserfassungen sind aufgrund anderer Landnutzungen innerhalb der Schutzzone relativ häufig nicht richtig geschützt, was die langfristige Wasserversorgungssicherheit gefährdet.

### 3 Bedeutung von Modelldaten für die Wasserbilanzierung

Sollen mögliche Knappheitssituationen für die Zukunft analysiert und quantitativ abgeschätzt werden, so sind dazu verschiedenste Modelldaten notwendig. CHAIX et al. (2016) schlagen vor, einen Vergleich zwischen den nachhaltig verfügbaren Wasserressourcen, den erschlossenen Ressourcen und dem Wasserbedarf anzustellen. Als Synthese dieses Vergleichs ist das REB-Diagramm (Ressourcen-Erschließung-Bedarf, siehe Abb. 2) vorgesehen.

Als Ressourcen gelten sowohl Grundwasser, als auch Oberflächenwasser. Die Analyse der erschlossenen Wasserressourcen ist einer der zentralsten Schritte für das Wasserressourcenmanagement, denn häufig entscheidet (in der Schweiz) die Erschließung über effektive Wasserknappheitsprobleme und nicht die theoretisch vorhandenen Ressourcen. Viele präventive Maßnahmen greifen denn auch auf der Ebene der Erschließung an. Bei der Erschließung wird weiter differenziert zwischen geschützten Ressourcen, konzessionierten Ressourcen und heute effektiv verbrauchten Ressourcen. Die Bedeutung der Erschließung kann am Beispiel der Grundwasserressourcen illustriert werden. Schweizweit werden die jährlich nachhaltig verfügbaren Grundwasserressourcen auf 18 km<sup>3</sup> geschätzt. Effektiv verbraucht werden davon heute aber nur ca. 7 %. (SINREICH et al. 2012). Trotzdem kann es lokal zu Knappheitssituationen kommen. Gründe dafür sind, dass ein Großteil dieser theoretisch verfügbaren Grundwasserressourcen nicht bundesrechtskonform geschützt oder die Ressource nicht technisch erschlossen ist und keine Konzession vorhanden ist.

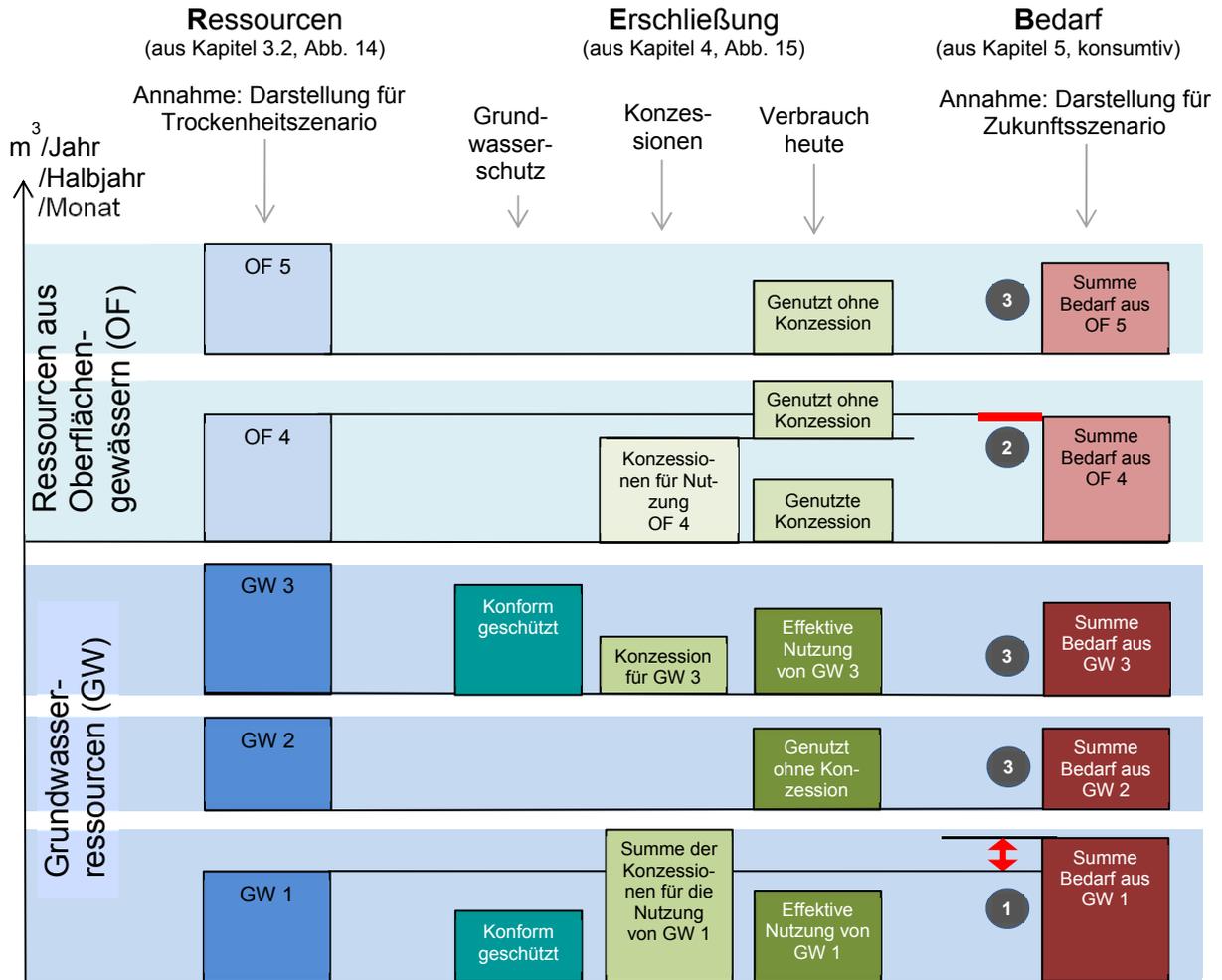
Schließlich wird der Wasserbedarf aus den verschiedenen wasserwirtschaftlichen Sektoren für die Zukunft abgeschätzt. Dabei sind die konsumtiven Wassernutzungen und die ökologischen Ansprüche in einem Bilanzierungsraum (siehe Kap. 2) zu addieren. Durch die Zuordnung und den Vergleich des künftigen Bedarfs mit den erschlossenen und den nachhaltig verfügbaren Ressourcen können mögliche Engpässe identifiziert und Stoßrichtungen für Maßnahmen abgeleitet werden.

Bezogen auf Wasserknappheitsprobleme interessieren insbesondere die zeitliche Variabilität (saisonale/monatliche Auflösung) und Extreme (Niedrigwasser, Spitzenbedarf). Zur Abschätzung der nachhaltig verfügbaren Ressourcen sind Wasserhaushaltsmodellierungen der Oberflächengewässer und des Grundwassers im Hinblick auf den Klimawandel gefragt.

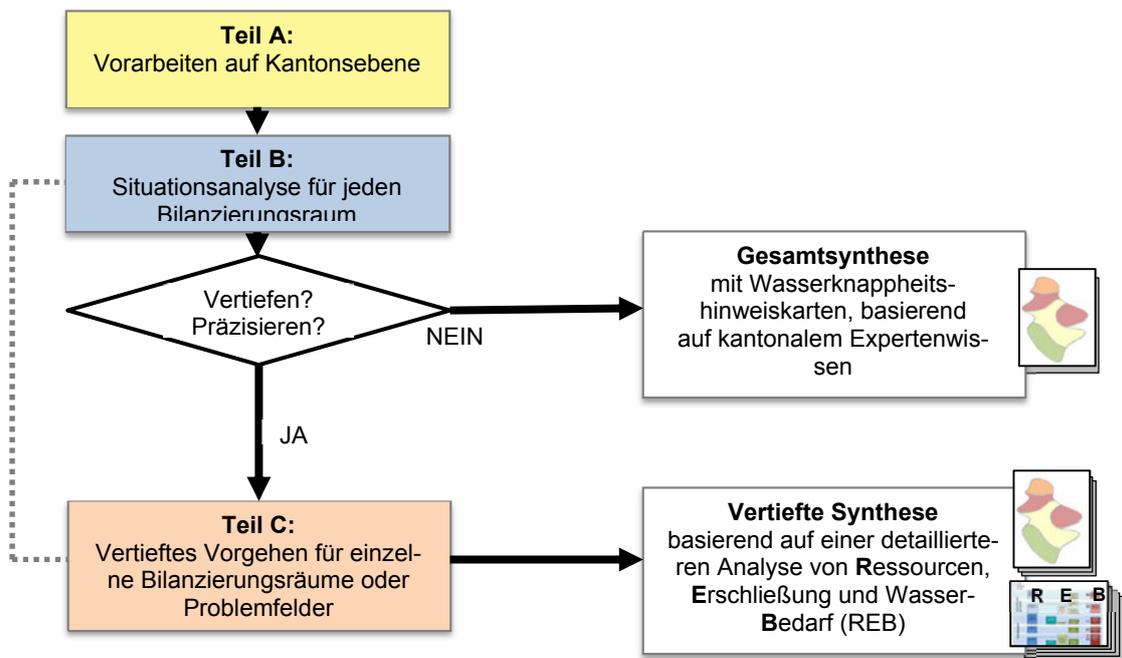
Abbildung 2 zeigt schematisch verschiedene theoretische Fälle für diese Bilanzierung auf. Beim mit 1 gekennzeichneten Fall übersteigt der zukünftige Wasserbedarf die Ressourcen aus dem Grundwasserträger 1. Zudem ist die konzessionierte Menge größer als die nachhaltig verfügbaren. Im Fall 2 ist der künftige Wasserbedarf mit den vorhandenen und konzessionierten Ressourcen nur knapp zu decken. In den mit 3 gekennzeichneten Fällen kann der Wasserbedarf auch in Zukunft in einem Trockenjahr gedeckt werden. Damit es zu keinen Knappheitssituationen kommt, muss in diesen Fällen aber die Erschließung verbessert werden.

### 4 Praxisanleitung zur Erstellung von Wasserknappheitskarten

Die Wasserbilanzierung anhand der Modelldaten und des REB-Diagramms ist eingebettet in die Praxisanleitung nach CHAIX et al. (2016). Ziel der Methode ist es, in einer Situationsanalyse das Untersuchungsgebiet (meist ein Kanton) in Risikogebiete hinsichtlich Knappheit und weniger sensible Gebiete einteilen zu können. Die Situationsanalyse dient erstens dazu, die möglichen Wasserknappheitsprobleme zu kennen und zweitens, eine Triage der Gebiete vorzunehmen, wo eine regionale Bewirtschaftung der Wasserressourcen notwendig ist.



**Abb 2:** Schematische Darstellung eines REB-Diagramms (Ressourcen-Erschließung-Bedarf) (Quelle: CHAIX et al. 2016)



**Abb. 3:** Zweiteiliges Vorgehen zur Situationsanalyse für das Wasserressourcenmanagement (Quelle: CHAIX et al. 2016)

Die Autoren schlagen dazu ein mehrstufiges Vorgehen vor. Die Teile A + B umfassen ein relativ pragmatisches Vorgehen auf Kantonsebene. Dieses basiert hauptsächlich auf bestehendem Expertenwissen. Das Untersuchungsgebiet wird in verschiedene Bilanzierungsräume eingeteilt. Für jeden Bilanzierungsraum werden die zu untersuchenden Problemfelder durchgescannt. Mit der Beurteilung der Relevanz und der Ausprägung kann mit Hilfe einer Matrix für jedes Problemfeld der Handlungsbedarf abgeschätzt werden. Aus diesen Teilen A + B resultiert eine Wasserknappheitshinweiskarte. Eine solche ist als relativ grobe Übersicht zu verstehen ohne vertiefte quantitative Analyse. Angesichts der Problematik ist ein pragmatisches Vorgehen für viele Gebiete ausreichend. Für Bilanzierungsräume und Problemfelder, die eine vertiefte Untersuchung erfordern, kommt in Teil C der beschriebene Ansatz des REB-Diagramms zum Einsatz.

## 5 Bisherige Erfahrungen mit der Methode

Die Praxisanleitung wurde bereits in verschiedenen Regionen der Schweiz angewandt. Als Beispiel für eine pragmatisch-gutachterliche Anwendung ist eine Wasserknappheitshinweiskarte für den Kanton Bern abgebildet (Abb. 4). Zur Erstellung der Karte wurde für jeden Bilanzierungsraum dasjenige Problemfeld ausgewählt, welches den höchsten Handlungsbedarf aufweist. Mit den unterschiedlichen naturräumlichen Bedingungen und den sowohl urbanen als auch ländlichen Gebieten widerspiegelt der Kanton Bern die schweizweite Variabilität sehr gut (nachfolgend von Nord nach Süd aufgeführt). Im karstigen Jura sind die größten Probleme bei der Sicherheit der Trinkwasserversorgung und einer ausreichenden Verdünnung bei der Einleitung von Abwasser auszumachen. Im Seeland, dem Gemüsegarten der Schweiz, dominieren dagegen Probleme und Konflikte rund um die Wasserbeschaffung für Bewässerungszwecke. Im Aare- und Emmental führen Landnutzungskonflikte beim Grundwasserschutz und teilweise eine ungenügende Verdünnung bei der Einleitung von Abwasser in den Vorfluter zu Problemen. Schaut man Richtung Alpen, in diesem Fall Richtung Berner Oberland, ist der Druck auf die Wasserressourcen tendenziell weniger groß. In einigen alpinen und voralpinen Regionen der Schweiz dürften die Probleme allerdings mit ansteigender Schneefallgrenze und den abschmelzenden Gletschern längerfristig auch hier zunehmen. Im Berner Oberland wurden dazu bereits Herausforderungen mit der Wasserbeschaffung für die Beschneidung identifiziert.

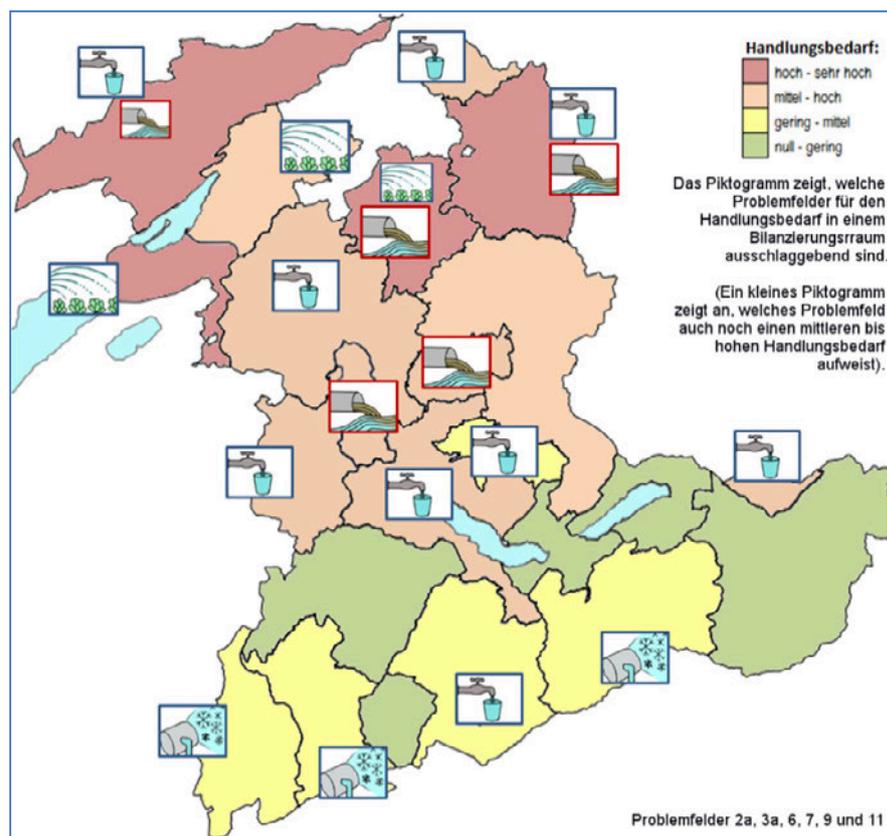
### Quantifizierung der Ressourcen

Hinsichtlich einer vertieften quantitativen Anwendung der Methode stehen bezüglich den vorhandenen Wasserressourcen verschiedenste Datengrundlagen aus dem Nationalen Forschungsprogramm 61<sup>2</sup> und dem BAFU-Projekt Klimawandel und Hydrologie (BAFU 2012b) zur Verfügung.

Zur Beurteilung der geschützten, erschlossenen und konzessionierten Ressourcen dienen meist Inventare der Kantone.

---

<sup>2</sup> [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch) (letzter Zugriff 2.5.2017)



**Abb. 4:** Wasserknappheitshinweiskarte am Beispiel des Kantons Bern  
(Quelle: CHAIX et al. 2016)

### Quantifizierung des Wasserbedarfs

Hingegen stellt die Abschätzung des Wasserbedarfs die Praxis immer noch vor große Herausforderungen. Bei der Wasserversorgung wird die Abschätzung seit Jahrzehnten hauptsächlich aufgrund von sozioökonomischen Szenarien (Bevölkerungsprognosen, Siedlungsentwicklung) durchgeführt und ist weit verbreitet. Hingegen gibt es kaum anwendbare Ansätze für die Praxis zur Abschätzung des künftigen Bewässerungsbedarfs im Kontext des Klimawandels.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen der entwickelten Praxisanleitung die Grundlagen aus dem Forschungsprojekt AGWAM (FUHRER et al. 2013) für die ganze Schweiz erweitert und für die Praxis heruntergebrochen (SMITH & FUHRER in CHAIX et al. 2016). Mit den vom BAFU zur Verfügung gestellten Excel-Tabellen lässt sich der Zusatzwasserbedarf für eine beliebige Region der Schweiz nun für zahlreiche landwirtschaftliche Kulturen und verschiedene Klimaszenarien einfach abschätzen. Im Rahmen des Pilotprojekts zur Anpassung an den Klimawandel im Kanton Thurgau<sup>3</sup> wird diese Methode zum ersten Mal angewandt. Die kulturspezifischen Werte zum Wasserbedarf werden für jede Parzelle mit den effektiv angebauten Kulturen aus dem Jahr 2015 kombiniert. Somit kann eine parzellenscharfe Abschätzung

<sup>3</sup> <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-an-den-klimawandel-in-den-kantonen.html> (letzter Zugriff 2.5.2017)

des Wasserbedarfs für verschiedene Klimaszenarien unter heutigen Anbaubedingungen relativ einfach durchgeführt werden. Der Vergleich des künftigen Wasserbedarfs dieser Kulturen pro Einzugsgebiet mit den prognostizierten Ressourcen in der Zukunft dient der Landwirtschaft nun als wichtige Planungsgrundlage für die Anpassung an den Klimawandel. Durch die Variation der Anbaubedingungen können zudem die Auswirkungen von sozioökonomischen Szenarien und die Konsequenzen von verschiedenen Handlungsoptionen für das Wassermanagement auf einfache Arte und Weise getestet werden.

## 6 Schlussfolgerungen

Modelldaten zu den nachhaltig verfügbaren Wasserressourcen, den erschlossenen Ressourcen und dem Wasserbedarf sind für eine vertiefte Situationsanalyse hinsichtlich der Wasserknappheitsprobleme unerlässlich. Fundierte quantifizierte Grundlagen bilden die Entscheidungsgrundlagen für eine Vielzahl von Maßnahmen für das regionale Wasserressourcenmanagement. Da Wasserknappheitsprobleme häufig räumlich und zeitlich beschränkt sind, ist bei den Modellierungen auf eine entsprechend hohe räumliche und zeitliche Auflösung zu achten. Die Forschung hat in den letzten Jahren eine große Menge an wissenschaftlich fundierten Grundlagen produziert. Für die Anwendung in der Praxis besteht aber immer noch eine beträchtliche Lücke an einfach anwendbaren Modelldaten. Für die Praxis werden Modelldaten gefordert, welche:

- > problem- und handlungsorientiert sind
- > die Konsequenzen von verschiedenen Handlungsoptionen aufzeigen
- > sowohl Klima- als auch sozioökonomische Szenarien berücksichtigen
- > eine pragmatische Verwendung der Daten erlauben (einfach verständlich, geringer Aufwand und Kosten, einfacher Zugang)

Die Defizite sind oftmals auch in der Darstellung und Kommunikation der Modellresultate auszumachen. Hier wird eine Darstellung gefordert, welche:

- > einfache und verständliche Aussagen macht
- > auf bestehenden Risiken und gemachten Erfahrungen an Stelle von abstrakten Projektionen beruht (bspw. Vergleich mit bisherigen Ereignissen wie Trockenheit 2003, 2011 oder 2015)
- > sich für die Sensibilisierung und den Wissenstransfer eines breiten Publikums eignet (nicht nur Fachspezialisten)

## Literatur

BAFU Bundesamt für Umwelt (Hrsg.) (2012a): Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Bericht des Bundesrates zum Postulat „Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderungen.“

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser.html>  
(letzter Zugriff 2.5.2017)

- BAFU Bundesamt für Umwelt (Hrsg.) (2012b): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S.  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/auswirkungen-klimaaenderung-wasserressourcen-gewaesser.html> (letzter Zugriff 2.5.2017)
- BAFU Bundesamt für Umwelt (Hrsg.) (2012c): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012.  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/anpassung-klimawandel-schweiz-2012.html> (letzter Zugriff 2.5.2017)
- BAFU Bundesamt für Umwelt (Hrsg.) (2014a): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014 - 2019. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014.  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/anpassung-klimawandel-schweiz-2014.html> (letzter Zugriff 2.5.2017)
- BAFU Bundesamt für Umwelt (Hrsg.) (2014b): Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken, Herausforderungen und Empfehlungen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1404: 116 S.  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/grundlagen-wasserversorgung-2025.html> (letzter Zugriff 2.5.2017)
- CHAIX, O., H. WEHSE, Y. GANDER, S. ZAHNER (2016): Bestimmung von Regionen mit Handlungsbedarf bei Trockenheit. Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt.  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser.html> (letzter Zugriff 2.5.2017)
- GDI Gottlieb Duttweiler Institute (Hrsg.) (2016): Wenn Wasser zum neuen Öl wird. Wie die Schweiz die Konflikte der Zukunft meistert.  
<http://www.gdi.ch/de/Think-Tank/Studien/Wenn-Wasser-zum-neuen-Oel-wird/727> (letzter Zugriff 2.5.2017)
- FUHRER, J., D. TENDALL, T. KLEIN, N. LEHMANN, A. HOLZKÄMPER (2013): Water Demand in Swiss Agriculture. Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. Agroscope.
- LANZ, K., E. RAHN, R. SIBER, C. STAMM (2014): Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck. Thematische Synthese 2 im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Bern  
<http://www.nfp61.ch/de> (letzter Zugriff 2.5.2017)
- SINREICH, M., R. KOZEL, V. LÜTZENKIRCHEN, F. MATOUSEK, P. Y. JEANNIN, SISKKA, S. LÖW, F. STAUFFER (2012): Grundwasserressourcen der Schweiz. Abschätzung von Kennwerten. In Aqua und Gas N°9.

SMITH, P., J. FUHRER in CHAIX et al. (2016): Anhang j. Ermittlung des Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft. Tabellen zur Ermittlung des Bewässerungsbedarfs.  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser.html> (letzter Zugriff 2.5.2017)

WEHSE, H., O. CHAIX, Y. GANDER, A. BIRRER, M. FRITSCH, B. MEYLAN, S. ZAHNER (2017): Erarbeitung von Massnahmen zur langfristigen Sicherstellung der Wasserressourcen. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt.

**Kontakt:**

**Samuel Zahner**

Bundesamt für Umwelt, Abteilung Wasser  
Papiermühlestrasse 172, 3063 Ittigen, Schweiz  
3003 Bern, Schweiz  
Tel.: +41 58 465 31 78  
E-Mail: [samuel.zahner@bafu.admin.ch](mailto:samuel.zahner@bafu.admin.ch)

# Wasserbewirtschaftungsdaten – Grundlage für Systemverständnis und Modellierung

Jochen Hohenrainer

## 1 Einleitung

Eine solide Datenbasis ist ein zentrales Element vielfältiger wasserwirtschaftlicher Untersuchungen. Wasserbewirtschaftungsdaten spielen dabei sowohl für die Erlangung von Prozessverständnis als auch bei der modellhaften Abbildung wasserwirtschaftlicher Systeme eine fundamentale Rolle: Anhand aussagekräftiger Daten lassen sich ablaufende Prozesse analysieren und die Bewirtschaftungspraxis, wie beispielsweise die Steuerung wasserwirtschaftlicher Anlagen quantifizieren. Zudem können anhand von Mengeninformatoren die Haupteinflussgrößen auf die wasserwirtschaftlichen Bilanzen von Gewässereinheiten (z. B. Stauhaltungen) identifiziert werden, was wiederum zur Ermittlung der maßgeblichen Faktoren bzw. Randbedingungen für den jeweiligen Untersuchungsgegenstand beiträgt. Nicht zuletzt spielen Wasserbewirtschaftungsdaten eine hervorgehobene Rolle, wenn natürliche und anthropogen bedingte Ursachen von beobachteten Phänomenen in Gewässern und deren Einzugsgebieten unterschieden werden sollen.

Die Art und der Umfang der für eine wasserwirtschaftliche Untersuchung erforderlichen Daten hängen stets von der jeweiligen Fragestellung ab. Eine erschöpfende Darstellung des Themenkomplexes „Daten in der Wasserwirtschaft“ ist im gesetzten Rahmen nicht möglich. Vielmehr sollen im vorliegenden Beitrag ausgewählte praxisrelevante Aspekte beleuchtet werden, die bei der Bearbeitung von Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung wiederkehrenden Charakter haben. Das nachfolgende Kapitel 2 widmet sich der Erläuterung zentraler Begriffe des Beitrages. Kapitel 3 enthält eine Beschreibung typischer Aspekte der Beschaffung, Prüfung und Aufbereitung von Wasserbewirtschaftungsdaten. Im Kapitel 4 werden exemplarisch Ergebnisse aus Datenanalysen vorgestellt, die im Rahmen von zwei bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) durchgeführten Untersuchungen gewonnen wurden. Kapitel 5 fasst abschließend wichtige Aspekte zusammen.

## 2 Begriffserläuterungen

Als Wasserwirtschaft wird allgemein die zielbewusste Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser (DIN 4049) bezüglich Menge, Güte und Ökologie (LAWA 1996) definiert. Die Wasserwirtschaft verfolgt dabei einen bestmöglichen Ausgleich zwischen dem Wasserbedarf verschiedener Nutzer und dem natürlich vorhandenen

Wasserdargebot (MANIAK 2005). Wasserbewirtschaftung lässt sich in diesem Kontext als das Teilgebiet der Wasserwirtschaft betrachten, das die Anwendung vielschichtiger Steuerungs-, Bewirtschaftungs- und Planungswerkzeuge umfasst (GRÜNEWALD 2001). Konkrete Beispiele sind die Steuerung von wasserwirtschaftlichen Systemen zur Wasserversorgung, der Abwasserbeseitigung, der Be- und Entwässerung sowie zum Hochwasserschutz. Hinzu kommt der Betrieb von wasserbaulichen Anlagen, wie Talsperren und Schifffahrtskanäle (Lexikon der Geowissenschaften 2000).

Wasserbewirtschaftungsdaten können somit als die durch direkte Messung oder aus abgeleiteten Größen gewonnenen Informationen verstanden werden, mit denen sich Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen qualitativ oder quantitativ beschreiben lassen. Im hier betrachteten Kontext stehen insbesondere diejenigen Daten im Fokus, mit denen sich die zeitliche und räumliche Umverteilung von Wassermengen (z. B. Entnahmen und Einleitungen, Schleusungs- und Pumpwasser) in oder aus Gewässern (z. B. Kanal- und Flusstauhaltungen, Talsperren, Rückhaltebecken oder frei fließende Gewässer) darstellen lässt. Des Weiteren lässt sich der Begriff auch auf Variablen ausweiten, die den (temporären) Zustand von Systemen bzw. Systemelementen charakterisieren (z. B. Wasserstände oder Füllungsvolumina in Speichern).

Bei zeitlich veränderlichem Systemverhalten sind wasserwirtschaftliche Zeitreihen von besonderer Bedeutung, da sich durch diese die zeitliche Dynamik (z. B. inner- oder zwischenjährlich) untersuchen lässt. Je nach Stärke der Variabilität können hier unterschiedliche zeitliche Auflösungen relevant sein. Bei Langfristuntersuchungen von wasserwirtschaftlichen Systemen sind Tages-, Monats- oder auch Jahreswerte typische Zeitdiskretisierungen. Ergänzend zu Beobachtungswerten von Wasserumverteilungsmaßnahmen können auch Angaben zu Bewirtschaftungsregeln (z. B. Betriebsvorschriften) und deren Umsetzung in der Praxis wichtige Beiträge zur Beschreibung wasserwirtschaftlicher Systeme liefern.

### **3 Datengewinnung und Aufbereitung**

#### **3.1 Beschaffung und Prüfung von Wasserbewirtschaftungsdaten**

Die Datenbeschaffung bei den zuständigen Behörden und Institutionen sowie die Prüfung und, wenn notwendig und möglich, die Korrektur fehlerbehafteter Daten spielt innerhalb von wasserwirtschaftlichen Untersuchungen eine zentrale Rolle. Je nach räumlicher und zeitlicher Skala der Untersuchungsinhalte können relativ umfassende Datenerhebungen erforderlich sein. Auf regionaler Ebene, im Bereich der Bundeswasserstraßen ist die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), vertreten durch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSÄ) in der Regel der erste Ansprechpartner für Bewirtschaftungsdaten. Bei den WSÄ liegen einerseits Aufzeichnungen der eigenen Steuerungsmaßnahmen vor und andererseits werden dort auch Daten zu den Wassernutzungen Dritter im jeweiligen Zuständigkeitsbereich gesammelt. Im Rahmen der Datenrecherche können auch Datenanforderungen direkt bei Nutzern (z. B. Landwirtschaft, Verbände, Industrie und Gewerbe, Kraftwerksbetreiber, Wasserversorgungs- und -entsorgungseinrichtungen, etc.) erforderlich sein, wenn die Daten bei den Ämtern nicht in einer für die jeweilige Untersuchung ausreichenden Detailtiefe vorliegen. Ergänzende Informationen lassen sich teilweise auch bei Landesbehörden

oder kommunalen Wasserbehörden akquirieren. Mit höher werdender räumlicher Ausdehnung gewinnen auch die statistischen Ämter des Bundes und der Länder an Bedeutung, die Wasserbewirtschaftungsdaten jedoch meist in geringer zeitlicher Auflösung vorhalten (BODENSEH 2017, s. S.51ff.).

Die Aufstellung der Datenbasis für eine Untersuchung ist stets mit einem Auswahlprozess verbunden, da die Wasserflüsse je nach betrachtetem Gewässer von verschiedenen Einflussfaktoren abhängen. Diese können sich untereinander in ihrer Größenordnung sowie in ihrem räumlichen (punktuell ↔ flächig) und zeitlichen (ganzjährig ↔ saisonal ↔ ereignisbasiert) Auftreten unterscheiden. Dabei sind die für die jeweilige Fragestellung relevanten Einflussgrößen von den weniger wichtigen zu unterscheiden. Die Datenprüfung kann je nach Art und Variable verschiedene Aspekte umfassen. Typische Kriterien bei der Plausibilitätsprüfung von Zeitreihen sind beispielsweise

- > Prüfung von Tages-, Monats- und/oder Jahressummen bzw. -mittelwerten
- > Überprüfung von Extremwerten (Minima und Maxima) und Variabilitäten
- > Prüfung der zeitlichen Dynamik von Mittelwerten bzw. Summen
- > Vergleich der Größenordnungen ausgewählter Bilanzgrößen untereinander

Erfahrungsgemäß ist die Anforderung, Bereitstellung und Prüfung von Wasserbewirtschaftungsdaten oftmals ein iterativer Prozess, der einen hohen zeitlichen Raum innerhalb von Projekten einnehmen kann.

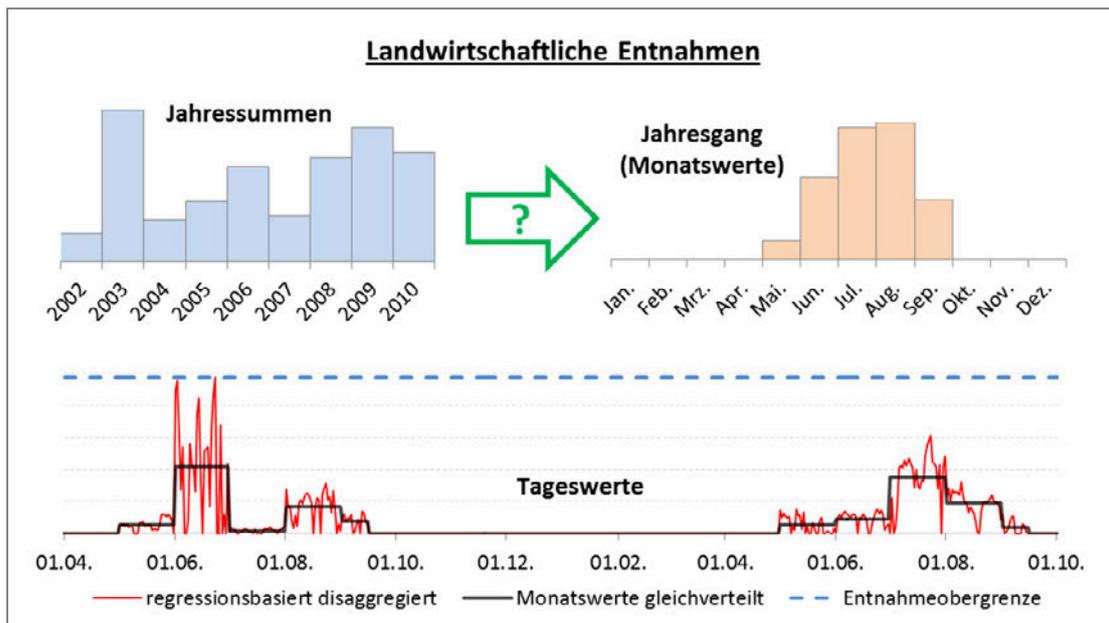
### **3.2 Wasserwirtschaftliche Bilanzen**

Ergänzend zur Einzelprüfung von Datenreihen hat sich die Erstellung wasserwirtschaftlicher Bilanzen zur integrierenden Überprüfung der für eine Untersuchung aufgestellten Datenbasis hinsichtlich Vollständigkeit und Plausibilität bewährt. In der wasserwirtschaftlichen Bilanz werden verschiedene Größen, z. B. die Wassernutzung und das vorhandene Wasserdargebot an einem Gewässerprofil, einander gegenübergestellt (z. B. GRÜNEWALD 2001). Bei der Erstellung von Wasserbilanzen für Kanalhaltungen lässt sich u. a. überprüfen, ob sich innerhalb eines definierten Zeitintervalls die Summe aller Zuflüsse (z. B. Einleitungen, Pumpwasser) und die Summe aller Abflüsse (z. B. Entnahmen, Schleusungswasserverluste) zur Haltung unter Berücksichtigung der Speicheränderung ausgleichen. Rechnerische Defizite oder Überschüsse in der Haltungsbilanz und deren Entwicklung im zeitlichen Verlauf (z. B. inner- und zwischenjährlich) können Hinweise darauf liefern, ob alle relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt wurden oder ob eine vertiefte Überprüfung und Erweiterung der Datenbasis notwendig ist. Zudem lassen sich Rückschlüsse auf die generelle Unsicherheit der Daten und den auf deren Grundlage erstellte Untersuchungsergebnisse ziehen.

### **3.3 Zeitauflösung von Wasserbewirtschaftungsdaten**

Bei der Analyse von Bewirtschaftungsdaten wird immer wieder deutlich, dass die zeitliche Auflösung, in der die Daten zugänglich sind, teilweise nicht die tatsächliche Dynamik des durch sie abgebildeten Prozesses widerspiegelt. Beispielsweise kommt es vor, dass Wasserentnahmen von Nutzern teilweise nur als Jahressummen an die verantwortlichen Behörden gemeldet werden. Diese Zeitauflösung kann dann ausreichend sein, wenn die Entnahme innerhalb eines Jahres relativ gleichmäßig verteilt ist. Wenn dies nicht zutrifft, wie z. B. bei der landwirtschaftlichen Bewässerung, die stark von den Wachstumsphasen der jeweiligen

Kulturpflanze bzw. den meteorologischen Bedingungen innerhalb eines Jahres abhängt, sind Methoden zur zeitlichen Disaggregation zu prüfen und anzuwenden (Abb. 1, oben). Im einfachsten Fall kann dies z. B. anhand von mittleren Jahresgängen oder durch Übertragung der Dynamik von Stellvertretervariablen (z. B. zeitlich höher aufgelöste Entnahmedaten aus angrenzenden Gebieten) erfolgen. Alternativ sind auch komplexere Methoden in Erwägung zu ziehen, beispielsweise der Einsatz spezifischer Prozessmodelle (im Falle landwirtschaftlicher Entnahmen z. B. Wachstums- bzw. Berechnungsmodelle).



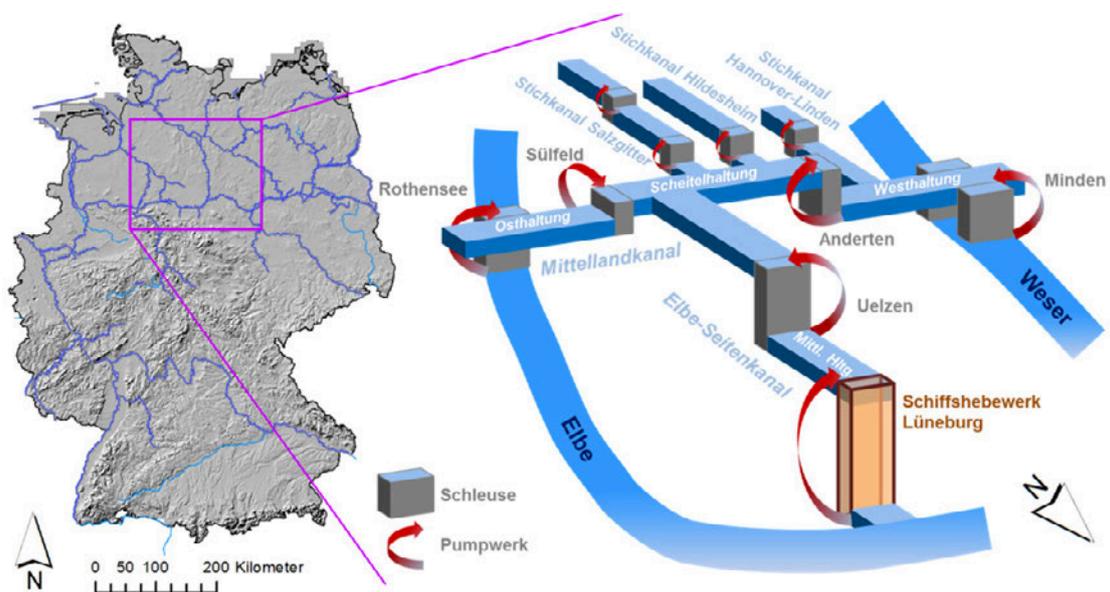
**Abb. 1:** Schematische Darstellung unterschiedlicher zeitlicher Diskretisierung von Wasserbewirtschaftungsdaten am Beispiel landwirtschaftlicher Entnahmen. Im oberen Bereich sind Entnahmesummen verschiedener Jahre (links) sowie Monatswerte eines Beispieljahres (rechts) abgebildet. Die Darstellung unten zeigt exemplarisch für zwei Berechnungsperioden das Ergebnis eines statistischen Verfahrens zur Disaggregation von monatlichen Entnahmesummen zu Tageswerten (rot) im Vergleich zur einer innermonatlich gleich bleibenden Entnahme (schwarz).

Die notwendige Schärfe der Zeitauflösung hängt wiederum von der Fragestellung ab. Bei Berücksichtigung von Extremsituationen sind entsprechend feine Zeitskalen (z. B. Tageswerte) zu betrachten und gröber aufgelöste Daten unter Einsatz geeigneter Methoden zu disaggregieren. Abbildung 1 (unten) zeigt exemplarisch das Ergebnis eines statistischen (regressionsbasierten) Verfahrens zur Verteilung monatlicher Berechnungswassermengen auf Tageswertebene (rote Ganglinie). Im dargestellten Beispiel lässt sich damit die temporäre Ausschöpfung bestehender Entnahmeobergrenzen durch die Landwirtschaftsbetriebe realistischer abbilden, als beispielsweise durch Annahme einer monatlich gleich bleibenden Entnahme (schwarze Ganglinie). Weitere Hintergrundinformationen zum dargestellten Beispiel sind von HOHENRAINER & EBNER VON ESCHENBACH (2016) dokumentiert.

## 4 Untersuchungsbeispiele

### 4.1 Elbe-Seitenkanal / Mittellandkanal

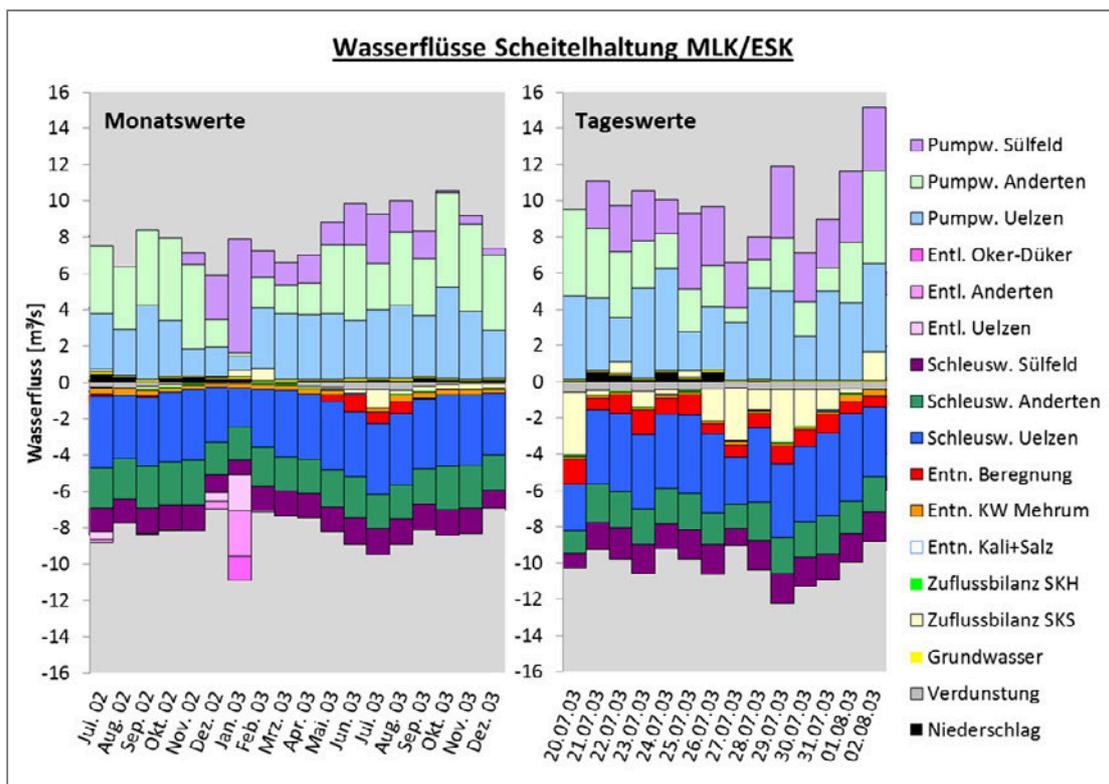
Der Mittellandkanal (MLK) führt in West-Ost-Richtung vom westdeutschen Kanalnetz, ausgehend vom Dortmund-Ems-Kanal, auf einer Länge von insgesamt ca. 325 km bis zum Elbe-Havel-Kanal, welcher den Anschluss an das ostdeutsche Wasserstraßennetz bildet. Der MLK gliedert sich in drei auf unterschiedlichen Höhenniveaus gelegene Kanalabschnitte (West-, Scheitel- und Osthaltung), welche durch Schleusen miteinander verbunden sind (Abb. 2). Der rund 115 km lange Elbe-Seitenkanal (ESK) zweigt von der Scheitelhaltung des MLK zwischen Braunschweig und Wolfsburg in nördlicher Richtung ab und führt von dort durch die Lüneburger Heide bis zur Elbe bei Artlenburg. Auch der ESK ist in drei Stauhaltungen (obere Haltung bzw. Scheitelhaltung, mittlere und untere Haltung) untergliedert, die über die Schleuse Uelzen und das Schiffshebewerk Lüneburg miteinander verbunden sind (Abb. 2). Zusammen mit der Elbe bilden ESK und MLK eine Wasserstraßenverbindung vom Seehafen Hamburg zu den niedersächsischen Industrieviereen im Raum Osthannover-Braunschweig sowie zum rheinisch-westfälischen Industriegebiet. Darüber hinaus ist über die beiden Kanäle eine im Vergleich zur Elbe zwischen Artlenburg und Magdeburg um ca. 33 km kürzere und von der Wasserführung der Elbe unabhängige Schifffahrtsverbindung möglich (BRAUN 1998). Neben ihrer Funktion als Binnenwasserstraßen dienen der ESK und der MLK der gewerblichen und landwirtschaftlichen Wasserversorgung sowie der Ableitung von Hochwasserabflüssen. Da die aus den Einleitungsbauwerken zufließenden Wassermengen nicht ausreichen, um die Wasserverluste der Kanäle (z. B. Schleusungswasser, Entnahmen, Verdunstung) ganzjährig zu kompensieren, wird zusätzlich Wasser aus der Weser und der Elbe in die Stauhaltungen gepumpt.



**Abb. 2:** Systemskizze der Schleusen und Pumpwerke am Elbe-Seitenkanal und Mittellandkanal zwischen Minden und Rothensee. Blickrichtung beim Schema rechts aus Nordost, d. h. Rothensee im Osten, Minden im Westen und Lüneburg im Norden des Untersuchungsgebietes.

In den Jahren 2014 bis 2016 wurde von der BfG im Auftrag der WSÄ Uelzen und Braunschweig untersucht, bis zu welcher Höhe zusätzliche, über die derzeitige Genehmigungslage hinausgehende, Wasserentnahmen für die landwirtschaftliche Feldberegnung aus der mittleren Haltung des ESK sowie der gemeinsamen Scheitelhaltung von ESK und MLK durch die bestehenden Pumpwerke kompensiert werden könnten. Dabei soll auch bei einem hohen Schifffahrtsaufkommen und weiterer hoher Nutzungsverluste stets die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffverkehrs ohne Einschränkungen gewährleistet sein (HOHENRAINER & EBNER VON ESCHENBACH 2016).

Die im Rahmen der Untersuchungen aufgebaute Datenbasis diente zum einen als Grundlage für die modellhafte Abbildung der realen Wassermengenbewirtschaftung im betrachteten Kanalsystem, die wiederum die Ausgangsbasis für Szenarienrechnungen mit veränderter Wassernutzung und Bewirtschaftung bildet (RICHTER 2017, s. S. 57ff.). Zum anderen ließen sich aus den Wasserbewirtschaftungsdaten wertvolle Erkenntnisse über die Prozessabläufe innerhalb des wasserwirtschaftlichen Systems gewinnen sowie die (zeitlich variablen Anteile der) Haupteinflussgrößen der Haltungsbilanzen identifizieren. Abbildung 3 veranschaulicht exemplarisch die Variabilität der verschiedenen Bilanzeinflussgrößen der Scheitelhaltung auf Monats- und Tageswertbasis.



**Abb. 3:** Bilanzeinflussgrößen der gemeinsamen Scheitelhaltung des Mittelkanals (MLK) und Elbe-Seitenkanals (ESK) in monatlicher (links) und täglicher (rechts) Zeitauflösung im Beispielzeitraum 07/2002 - 12/2003 bzw. 20.07. - 02.08.2003 (Pump.: Pumpwasser, Entl.: Entlastungswasser, Schw.: Schließungswasser, Entn.: Entnahme, KW: Kraftwerk, SKH: Stichkanal Hildesheim, SKS: Stichkanal Salzgitter). Darstellung als gestapelte Säulen, d. h. die Summe der jeweiligen Zuflüsse (positiv) und Verluste (negativ) ist für jeden Monat bzw. Tag direkt an der Ordinatenachse ablesbar.

Bei Betrachtung der Bilanzgrößen zeigt sich beispielweise, dass im Darstellungszeitraum die Schleusungswasserverluste an den jeweiligen Standorten eine relativ geringe Variabilität aufweisen, wohingegen die Anteile der an der Bedarfsdeckung der Haltung beteiligten Pumpwerke stärker schwanken. Die Daten verdeutlichen, dass in der täglichen Bewirtschaftung die Pumpmenge am jeweiligen Schleusenstandort nicht immer der dortigen Schleusenverlustmenge entspricht, sondern dass der Einsatz der jeweiligen Pumpwerke von weiteren Randbedingungen abhängt.

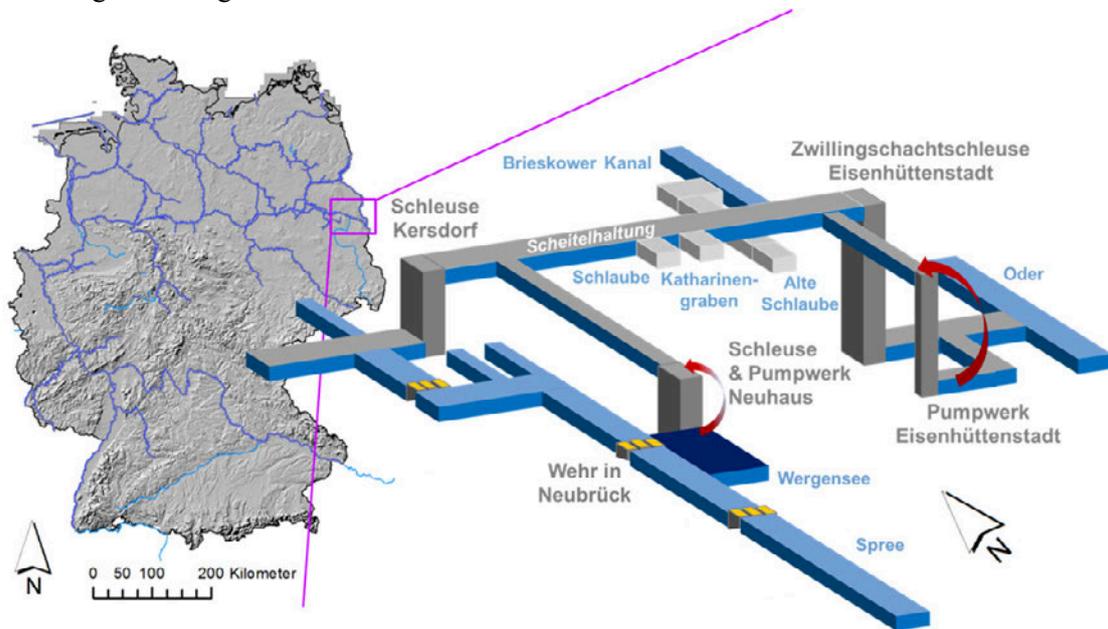
Des Weiteren lässt sich erkennen, dass aus der Bewirtschaftung der Stichkanäle Hildesheim (SKH) und Salzgitter (SKS), die beide in südliche Richtung von der Scheitelhaltung des MLK abzweigen (Abb. 2), für eben diese je nach betrachtetem Zeitintervall deutliche Verluste oder aber auch Zuflüsse resultieren können. Innerhalb der beiden Stichkanäle ist über Schleusen der Aufstieg vom Niveau des MLK in jeweils höher gelegene Kanalhaltungen möglich. Über die an den Schleusenstandorten installierten Pumpwerke können die beim Schleusungsvorgang verlorenen Wassermengen wieder in die oberen Haltungen zurückgepumpt werden. Die Analyse der Wasserbewirtschaftungsdaten offenbart, dass sich hierbei Schleusungs- und Pumpwassermengen oftmals nicht ausgleichen, sondern teilweise deutlich mehr Wasser in die höheren Haltungen der Stichkanäle zurückgepumpt wird, als diese durch die Schleusen verloren haben. Im Falle des SKS kann dies zu einem Nettoverlust für die Scheitelhaltung von bis zu 3,5 m<sup>3</sup>/s im Tagesdurchschnitt und bis zu 1,0 m<sup>3</sup>/s im Monatsdurchschnitt, zusätzlich zu den übrigen Wasserverlusten, führen (z. B. im Juli 2003, Abb. 3). Die Wasserflüsse zwischen MLK und SKS bzw. SKH können somit einen hohen Einfluss auf die tägliche Wasserbilanz der Scheitelhaltung haben und sind damit wichtige, in der Untersuchung zu berücksichtigende, Randbedingungen.

Das Beispiel verdeutlicht, dass insbesondere bei Berücksichtigung extremer Situationen in einer Untersuchung eine detaillierte Analyse von Wasserbewirtschaftungsdaten auf Tageswertbasis unumgänglich ist, wenn eine fundierte Ausgangsbasis für belastbare Szenarienrechnungen mit modifizierten Randbedingungen geschaffen werden soll. Weitere Details sowie die Ergebnisse der Untersuchung sind im BfG-Bericht 1898 (HOHENRAINER & EBNER VON ESCHENBACH 2016) dokumentiert.

## **4.2 Scheitelhaltung Spree-Oder-Wasserstraße**

Die Spree-Oder-Wasserstraße (SOW) führt durch verschiedene Gewässerabschnitte der Spree, der Dahme und des Oder-Spree-Kanals. Ausgehend von der Mündung der Spree in die Havel bei Berlin-Spandau führt sie auf einer Länge von ca. 130 km in vorwiegend östlicher Richtung bis zur Oder in Eisenhüttenstadt. Die Scheitelhaltung der SOW liegt im östlichen Abschnitt des Oder-Spree-Kanals und überbrückt die Wasserscheide zwischen Spree und Oder. Sie wird begrenzt durch die Schleusenstandorte Kersdorf im Westen, Neuhaus im Süden und Eisenhüttenstadt im Osten (Abb. 4). Wasserverluste der Scheitelhaltung, die primär aus dem Schleusenbetrieb, aber auch durch industrielle Wasserentnahmen, Verdunstung und Versickerung aus dem Kanal resultieren, werden nur zum Teil durch oberirdische Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet der Haltung (z. B. über die Schlaube) kompensiert. Der überwiegende Teil wird über zwei Pumpwerke in Neuhaus und Eisenhüttenstadt ausgeglichen. Dabei ist die Versorgung aus dem von der Spree gespeisten Wergensee über das Pumpwerk Neuhaus mit einer mittleren Hubhöhe von ca. 1,2 m energetisch günstiger als aus der Oder über

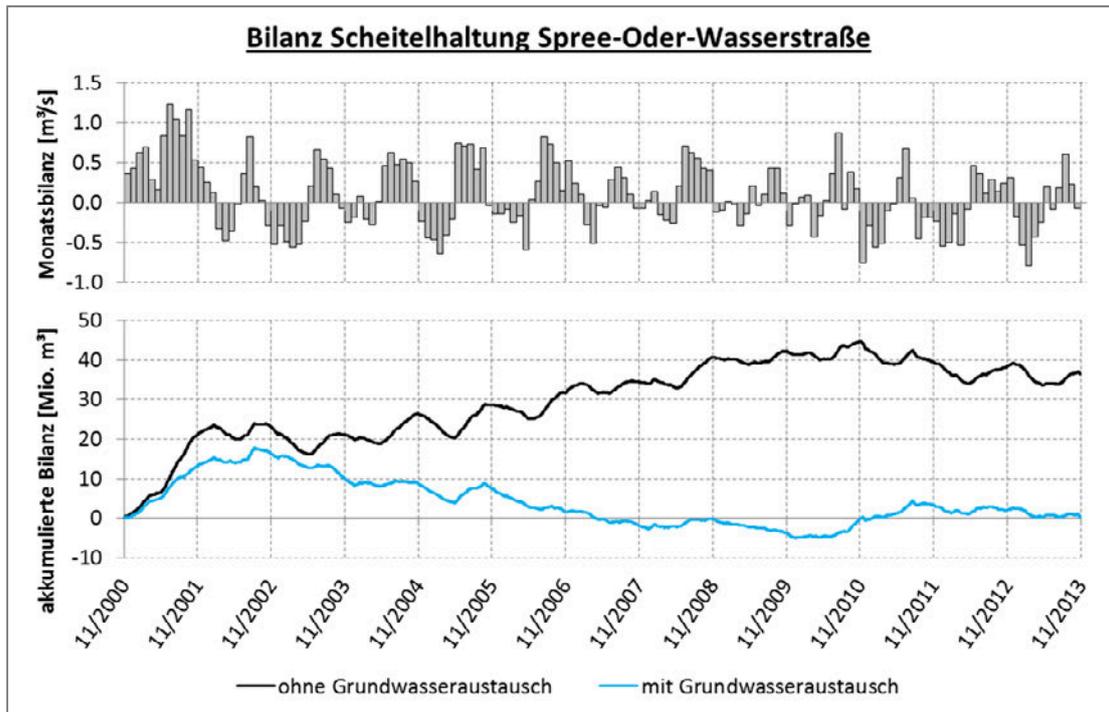
das Pumpwerk Eisenhüttenstadt (mittlere Hubhöhe ca. 12,7 m). Allerdings wird der Pumpbetrieb in Neuhaus limitiert durch die zu berücksichtigende Einhaltung des Mindestdurchflusses am unterstromig zur Scheitelhaltung gelegenen Pegel Große Tränke UP/Müggelspree sowie aufgrund baulicher Randbedingungen am Pumpeneinlauf. Zum Schutz der Pumpen vor Beschädigung durch Trockenlauf ist der Pumpbetrieb nur bis zu einem bestimmten Wasserstand im Wergensee möglich.



**Abb. 4:** Systemskizze der Schleusen und Pumpwerke in der Scheitelhaltung der Spree-Oder-Wasserstraße. Blickrichtung beim Schema rechts aus Südwest, d. h. Eisenhüttenstadt im Osten, Kersdorf im Westen und Neuhaus im Süden des Untersuchungsgebietes.

Derzeit wird vom Wasserstraßen-Neubauamt (WNA) Berlin im Rahmen der Bauwerksunterhaltung ein Ersatzneubau für das Pumpwerk Neuhaus geplant. Vor diesem Hintergrund hat das WNA Berlin die BfG mit der Untersuchung der Auswirkungen von möglichen Änderungen der Rahmenbedingungen bei der zukünftigen Bewirtschaftung der Scheitelhaltung beauftragt. In diesem Kontext ergab sich die Notwendigkeit der Erstellung einer mehrjährigen, detaillierten Kanalwasserbilanz der Scheitelhaltung der SOW.

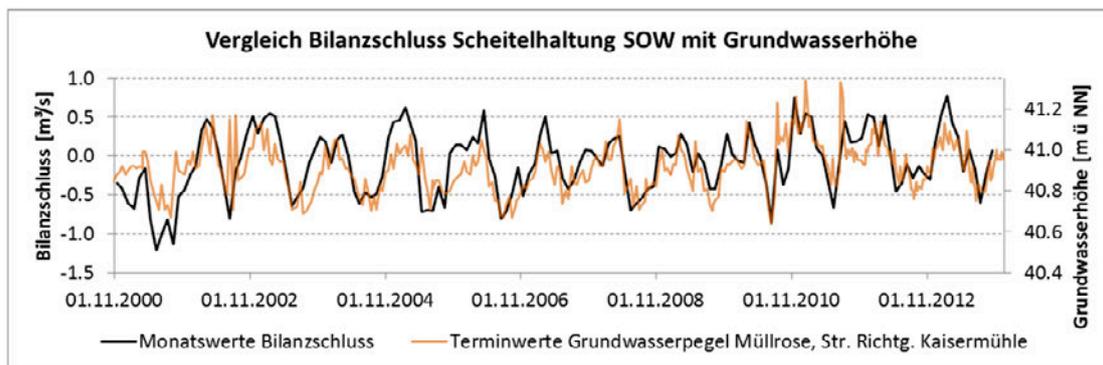
Bei der Bilanzierung wurden die Zuflussgrößen der Scheitelhaltung (Pumpwasser, Niederschlag auf die Haltung, oberirdischer Zufluss) den Verlustgrößen (Schleusungswasser, Verdunstung von der Haltungsoberfläche, industrielle Nutzungsverluste) gegenübergestellt. Für die Bilanzierung lagen Tageswerte der jeweiligen Größen im Zeitraum von November 2000 bis Oktober 2013 vor. Da in dieser Periode nur ca. 26 % des oberirdischen Einzugsgebietes der Scheitelhaltung durch verlässliche Pegeldata abgedeckt waren, erfolgte eine Regionalisierung des Abflusses aus dem restlichen Einzugsgebiet unter der Annahme vergleichbarer hydrologischer Verhältnisse. Abbildung 5 (oben) zeigt die aus den vorliegenden Daten berechnete monatliche Bilanz der Scheitelhaltung.



**Abb. 5:** Darstellung der sich aus den primär verfügbaren Informationen (ohne Grundwasseraustausch) ergebenden monatlichen Bilanzen der SOW-Scheitelhaltung (oben) im Zeitraum 11/2000 bis 10/2013. Die schwarze Ganglinie (unten) zeigt entsprechend die über diesen Zeitraum akkumulierte Bilanzganglinie. Die blaue Ganglinie (unten) zeigt analog die akkumulierte Bilanz, jedoch unter Berücksichtigung des abgeleiteten Grundwasseraustausches des Kanals und seiner angeschlossenen Gewässer.

In dem Säulendiagramm lässt sich u. a. ein saisonales Muster mit rechnerischen „Überschüssen“ (positive Werte) überwiegend im Sommer und „Defiziten“ (negative Werte) überwiegend im Winter erkennen. Im Durchschnitt liegt die Bilanz bei  $-0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ . Da die reale Kanalbilanz auf Monatswertbasis geschlossen, d. h. Null, ist (Speicheränderung auf Monatswertebene ist hier vernachlässigbar), weisen positive Bilanzwerte auf einen nicht berücksichtigten Verlust und negative Werte auf einen nicht berücksichtigten Zufluss hin. Hinweise auf mögliche Ursachen finden sich in der Literatur in Form eines Grundwasseraustausches zwischen den ungedichteten Abschnitten des Kanals und seiner Umgebung. Zur Höhe der Wasserflüsse existieren unterschiedliche Angaben, die örtlich von einem mittleren Zustrom von ca.  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  bis zu einem mittleren Abstrom von ca.  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  reichen (zitiert in FINKE & DORNBLUT 1996 und FINKE et al. 2001). Gesicherte Werte sind aufgrund fehlender grundwasserhydraulischer Untersuchungen nicht verfügbar.

Ein Vergleich der zur Schließung der monatlichen Bilanz notwendigen Wasserflüsse der Haltung mit Grundwassermesswerten an einem dem Kanal nahe gelegenen Grundwasserpegel (Messstelle 37529003) des Landesamtes für Umwelt Brandenburg (horizontaler Abstand ca. 560 m) untermauert einen Zusammenhang zwischen Grundwasser und Kanalbilanz (Abb. 6). Die beiden Ganglinien weisen deutliche Ähnlichkeiten in der innerjährlichen und der zwischenjährlichen Dynamik auf (Korrelationskoeffizient auf Monatswertbasis: 0,75). Neben dem Grundwasseraustausch lassen sich auch Unsicherheiten in der Ermittlung der übrigen Bilanzinflussgrößen, insbesondere bei der Zuflussregionalisierung, als Ursache für die nicht geschlossene Kanalbilanz anführen.



**Abb. 6:** Vergleich der zur Schließung der monatlichen Bilanz notwendigen Wasserflüsse der SOW-Scheitelhaltung (schwarz) mit Terminwerten des Grundwasserspiegels an der Messstelle 37529003 (Müllrose, Str. Richtg. Kaisermühle) des Landesamtes für Umwelt Brandenburg (orange) im Zeitraum 11/2000 bis 10/2013.

Für die Modellierung des Systems unter gegenwärtigen (Ist-Zustand) und geänderten Randbedingungen (Szenarien) sind die beobachteten Bilanzabweichungen von Null insofern problematisch, da mit dem angewandten Simulationsmodell BEWASYS Rhein-Oder (EBNER VON ESCHENBACH 2017, s. S. 93ff.) der zur Verlustkompensierung notwendige Pumpaufwand verzerrt abgebildet werden würde (Unterschätzung im Sommer, Überschätzung im Winter). Vor diesem Hintergrund wurde der Grundwasseraustausch des Kanals mit seiner Umgebung mit Hilfe eines zwischen dem Bilanzschluss und den Grundwasserständen (vgl. Abb. 6) abgeleiteten Regressionsmodells näherungsweise abgebildet und in der Bilanzierung und Modellierung berücksichtigt. Abbildung 5 (unten) verdeutlicht die damit erzielte Verringerung der Bilanzabweichungen von Null anhand kumulativer Bilanzganglinien.

Im vorgestellten Beispiel wurde gezeigt, dass Wasserbewirtschaftungsdaten auch Einsichten in natürliche Prozesse (Grundwasseraustausch) vermitteln können, wenn hierzu keine oder nur wenige Informationen vorliegen. Die Dokumentation weiterer Details sowie der Ergebnisse der Untersuchung in Form eines BfG-Berichtes befindet sich derzeit in Bearbeitung.

## 5 Fazit

Ziel des Textbeitrages ist die Hervorhebung der Bedeutung verlässlicher Bewirtschaftungsdaten für wasserwirtschaftliche Untersuchungen. Robuste Bewirtschaftungsdaten sind essentiell für die computergestützte Modellierung wasserwirtschaftlicher Systeme. Sie dienen als Referenz bei der Parametrisierung und Validierung von Simulationsmodellen. Unvollständige oder fehlerhafte Daten können zur Modellierung unter falschen Annahmen führen, wobei im ungünstigen Fall die Aussagekraft der Modellierungsergebnisse gänzlich in Frage gestellt werden können. Darüber hinaus liefern Wasserbewirtschaftungsdaten wertvolle Einsichten in wasserwirtschaftliche Systeme, können aber auch das Verständnis von natürlichen Prozessen erhöhen (Beispiel Grundwasseraustausch). In der Praxis zeigt sich, dass die Beschaffung (kleinräumiger) Wasserbewirtschaftungsdaten aufgrund der meist dezentral, bei unterschiedlichen Behörden, angesiedelten Datenerhebung und -haltung oftmals mit einem großen Zeitaufwand verbunden ist, der zu Projektbeginn häufig schwer einschätzbar ist. Zentrale Datenbanken, wie z. B. ÜWA (ROTH 2017, s. S. 44ff.), bergen hier wertvolles Verbesserungspotenzial für die Zukunft.

## Literatur

- BODENSEH, M. (2017): Amtliche Wasserstatistik – Ergebnisse und Methoden. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 51-56
- BRAUN, H.-G. (1998): Der Elbe-Seitenkanal, in Eckoldt, M. (Hrsg.): Flüsse und Kanäle – Die Geschichte der deutschen Wasserstraßen, DSV-Verlag, Hamburg.
- CASH, D. W., W. N. ADGER, F. BERKES, P. GARDEN, L. LEBEL, P. OLSSON, L. PRITCHARD, O. YOUNG (2006): Scale and Cross-Scale Dynamics: Governance and Information in a Multilevel World, *Ecology and Society* 11(2): 8.
- DIN 4049 (1992): DIN 4049 Teil 1: Hydrologie: Grundbegriffe, Deutsches Institut für Normung e.V.
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D. (2017): Wassermengenbewirtschaftung von Bundeswasserstraßen – Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 93-105
- FINKE, W., I. DORNBLUT (1996): Wasserversorgung der Scheitelhaltung des Oder-Spree-Kanals. Teilbericht 1: Datenrecherche und Kanalwassergrobbilanz 1986-1995, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1024.
- FINKE, W., G. FÜRTIG, A. HAUNSCHILD, L. HERRMANN, S. KRAUSE, K. RICHTER, A. SCHULZ (2001): Wasserversorgung der Scheitelhaltung des Oder-Spree-Kanals. Teilbericht 2: Untersuchungen zum Wasserhaushalt und zur Kanalwasserbilanz 1986 bis 1999, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1289.
- HOHENRAINER, J., A.-D. EBNER VON ESCHENBACH (2016): Untersuchungen zu den Auswirkungen zusätzlicher Wasserentnahmen für die Feldberegnung aus dem Elbe-Seitenkanal und der Scheitelhaltung des Mittellandkanals - Vollständige Fassung, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1898.
- GRÜNEWALD, U. (2001): Wasserwirtschaftliche Grundlagen. In: Lecher, K., Lühr, H.-P., und U. C. E. Zanke (Hrsg.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 8. Auflage, Parey, Berlin.
- LAWA (1996): Nationale Gewässerschutzkonzeption - Aktuelle Schwerpunkte, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Beschluss der 107. LAWA-Vollversammlung am 20. 9. 1996.
- Lexikon der Geowissenschaften (2000): Eintrag „Wasserbewirtschaftung“, Spektrum, Heidelberg, Online-Abruf am 16.12.2016:  
<http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/wasserbewirtschaftung/17960>
- MANIAK, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft, 5. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg.
- RICHTER, K. (2017): Szenarien zur Wassernutzung – projektspezifische Erfahrungen und Erkenntnisse. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 57-67
- ROTH, H. (2017): Datenbanksystem für Wassernutzungsdaten ÜWA (Infosystem Überregionale Wasserbewirtschaftung). In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 44-50

**Kontakt:**

**Jochen Hohenrainer**

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261/ 1306 5180

E-Mail: [hohenrainer@bafg.de](mailto:hohenrainer@bafg.de)

# Datenbanksystem für Wassernutzungsdaten ÜWA (Informationssystem Überregionale Wasserbewirtschaftung)

Harald Roth

## 1 Einleitung

### 1.1 Daten als wertvolles Gut

Schlagworte wie „Industrie 4.0“, „Internet der Dinge“, „Open Data“, „Digitale Transformation“ künden eine tiefgreifende Veränderung in unserer Gesellschaft an. Wesentlicher Treiber dieses Wandels sind digitale, vernetzte Daten. Sie werden auch als Rohstoff des 21. Jahrhunderts bezeichnet. Die Politik befasst sich mit diesem Thema zum Beispiel in der Digitalen Strategie 2025 (BMWi 2016).

Der Wert von Daten lässt sich dadurch steigern, dass die Daten vereinheitlicht, integriert, vernetzt und themenbezogen aufbereitet und präsentiert werden. Durch den Fortschritt in der IT-Technologie können immer mehr dieser Prozesse automatisiert werden und immer größere Datenmengen erfasst und verarbeitet werden. So entsteht unter Beteiligung von IT-Systemen und Menschen aus den Daten durch intelligente Verknüpfung Wissen und ein Nutzen für Bürger, Wirtschaft und Verwaltung.

Fortschritte sind auch bei der Normung und der freien Verfügbarkeit von Daten und der Architektur von IT-Landschaften zu verzeichnen. Das Open Geospatial Consortium (OGC) beispielsweise ist eine gemeinnützige Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, raumbezogene Informationsverarbeitung auf Basis allgemeingültiger Standards zum Zweck der Interoperabilität festzulegen. OpenStreetMap ist ein freies Projekt mit dem Zweck, frei nutzbare Geodaten zu sammeln und für die Nutzung durch jedermann in einer Datenbank vorzuhalten. IT-Systeme werden zunehmend über serviceorientierte Architekturen miteinander vernetzt.

Dies gilt auch für IT-Systeme und Daten zur Wassernutzung im Allgemeinen und für Bewirtschaftungsdaten zu Haltungen an Bundeswasserstraßen im Besonderen. Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) hat deshalb beschlossen, ein Informationssystem zur automatisierten zentralen Bereitstellung von Bewirtschaftungsdaten zu schaffen.

### 1.2 Ausgangssituation und Zielsetzung für das Informationssystem ÜWA

Die WSV ist zuständig für die Wasserbewirtschaftung der Kanäle zwischen Rhein, Weser, Elbe und Oder. Auslöser für die Erstellung des Systems ÜWA war der Bedarf an zentral verfügbaren, einheitlichen und aktuellen Informationen zu bewirtschaftungsrelevanten Daten an

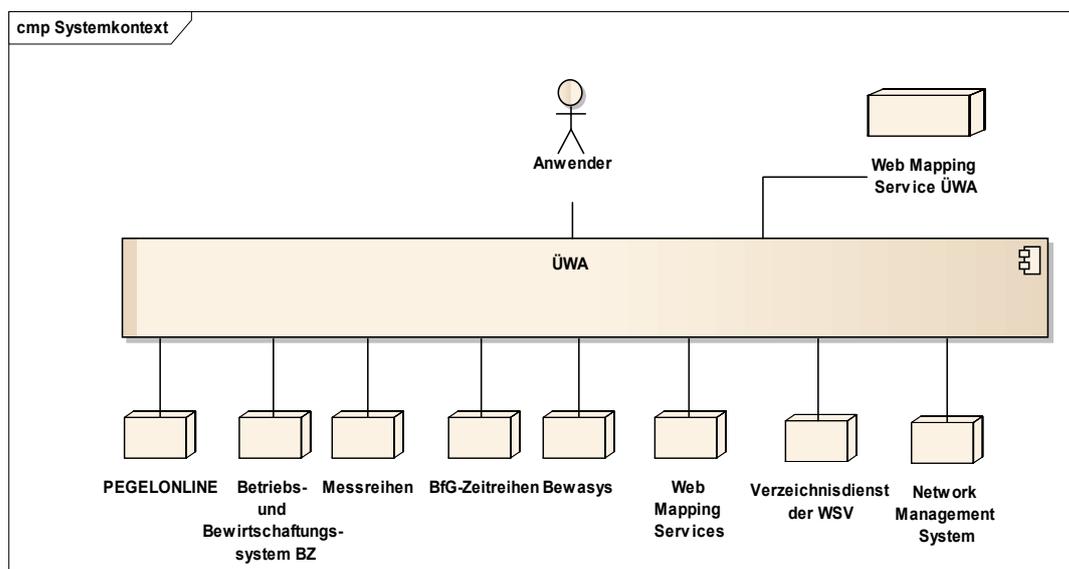
Haltungen von Bundeswasserstraßen. Die Wasserbewirtschaftung des o. g. Kanalsystems erfolgt regional verteilt durch die drei Betriebszentralen Datteln, Minden und Rothensee. Die Betriebszentralen arbeiten mit unterschiedlichen Systemen zur Steuerung der Bewirtschaftung. Ein Zugriff übergreifend ist nicht möglich.

Aufgabe von ÜWA ist es, ein tagesaktuelles Gesamtbild der wasserwirtschaftlichen Situation und der Maßnahmen bereitzustellen. Das System soll eine Entscheidungshilfe bieten, um in Absprache mit den Nachbarbetriebsstellen ein Tageskonzept für die Bewirtschaftung aufstellen zu können. Ein weiteres Ziel ist es, die bewirtschaftungsrelevanten Daten auch historisch vorzuhalten und diese für Langzeitanalysen und als Grundlage für Simulationen im System BEWASYS der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bereitzustellen.

## 2 Das Informationssystem ÜWA

### 2.1 Systemkontext

Das Informationssystem ÜWA besitzt eine moderne und erweiterbare serviceorientierte Architektur. Es ist in einen Kontext von Nachbarsystemen eingebunden, aus denen es Daten entgegennimmt, aber auch an diese abgibt. Anwender des Systems können über das Intranet der WSV ohne Installation einer speziellen Software über einen Browser auf das System zugreifen. Der Zugriff auf das System ist über eine flexible Berechtigungssteuerung geschützt.



**Abb. 1:** Systemkontext ÜWA

Zur Kartendarstellung greift ÜWA über OGC-konforme Web Mapping Services (WMS) auf Hintergrundkarten und Luftbilder der WSV und auf OpenStreetMap zu. Informationen zu Anlagen wie Sicherheitstoren oder Hochwassersperstoren bezieht ÜWA über OGC-konforme Web Feature Services (WFS).

ÜWA übernimmt stündlich oder täglich automatisch die Bewirtschaftungsdaten der drei Betriebszentralen. Fallweise kann der Anwender Werte von Messreihen oder charakteristischen Zeitreihen nach ÜWA importieren und Bewirtschaftungsdaten nach BEWASYS exportieren.

Zur Präsentation von Messwerten als Zeitreihen ist ÜWA an das System PEGELONLINE der WSV angebunden. Datenlieferungsverpflichtungen aufgrund des Gesetzes zur Regelung des Zugangs zu Informationen des Bundes (Informationsfreiheitsgesetz, IFG) und des Umweltinformationsgesetzes (UIG) erfolgen über OGC-konforme Web Mapping Services und das GeoPortal.WSV.

Für die Authentifizierung der Anwender ist ÜWA mit dem Verzeichnisdienst der WSV verbunden, für das technische Monitoring mit dem Network Management des Informationstechnikzentrums Bund (ITZBund).

## 2.2 Enthaltene Daten

ÜWA enthält Informationen zu den Orten, an denen Wassermengen in Haltungen von Bundeswasserstraßen beeinflusst oder gemessen werden, sowie für diese Orte die Werte der Beeinflussung über die Zeit. Die Daten der Fachobjekte sind also räumlich und zeitlich verteilt. Die Fachobjekte im Detail zeigt die Abb. 2.

Der lesende oder schreibende Zugriff auf die Daten wird über rollenbasierte Zugriffsrechte gesteuert.

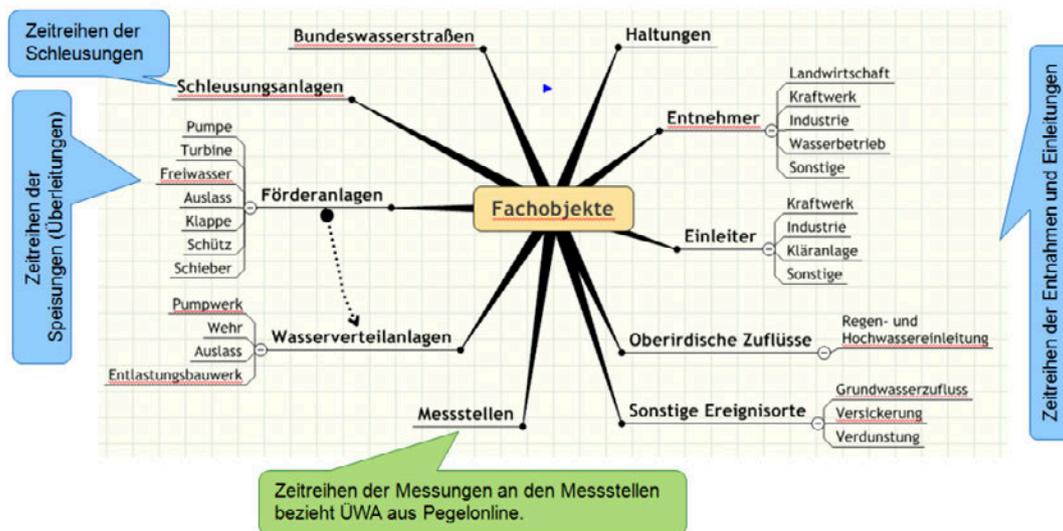


Abb. 2: In ÜWA verfügbare Fachobjekte

## 2.3 Aufbereitung der Daten

ÜWA stellt neben den Import- und Anzeigefunktionen auch Funktionen zur Aggregation und Weiterverarbeitung der Bewirtschaftungsdaten zur Verfügung. So können die Daten in der zeitlichen und in der räumlichen Dimension auf verschiedene Aggregationsstufen verdichtet werden und durch inhaltliche Verdichtung Kennzahlen aus den Daten abgeleitet werden.

So berechnet ÜWA bspw. automatisch täglich die Wasserbilanzen für die einzelnen Haltungen und legt diese als Zeitreihe ab. Bei der Berechnung der Haltungsbilanzen erfolgt eine Einstufung in Defizitklassen.

## 2.4 Präsentation und Auswertung der Daten

Die Gewässer und Anlagen werden in ÜWA auf einer Karte in ihrer räumlichen Verteilung oder wahlweise tabellarisch dargestellt. Eine Legende zeigt die Bedeutung der Symbole auf der Karte. Die darzustellenden Informationen können thematisch ausgewählt und somit verschiedene Aspekte hervorgehoben werden (Abb. 3).

Zur räumlichen Orientierung können verschiedene Hintergrundkarten sowie Luftbilder und weitere Informationen über WMS- oder WFS-Dienste anderer Systeme eingeblen-det werden (Abb. 4).

Für die einzelnen Anlagen können die Werte der Zeitreihen der Schleusungen oder Speisun-gen direkt angezeigt werden (Abb. 5).

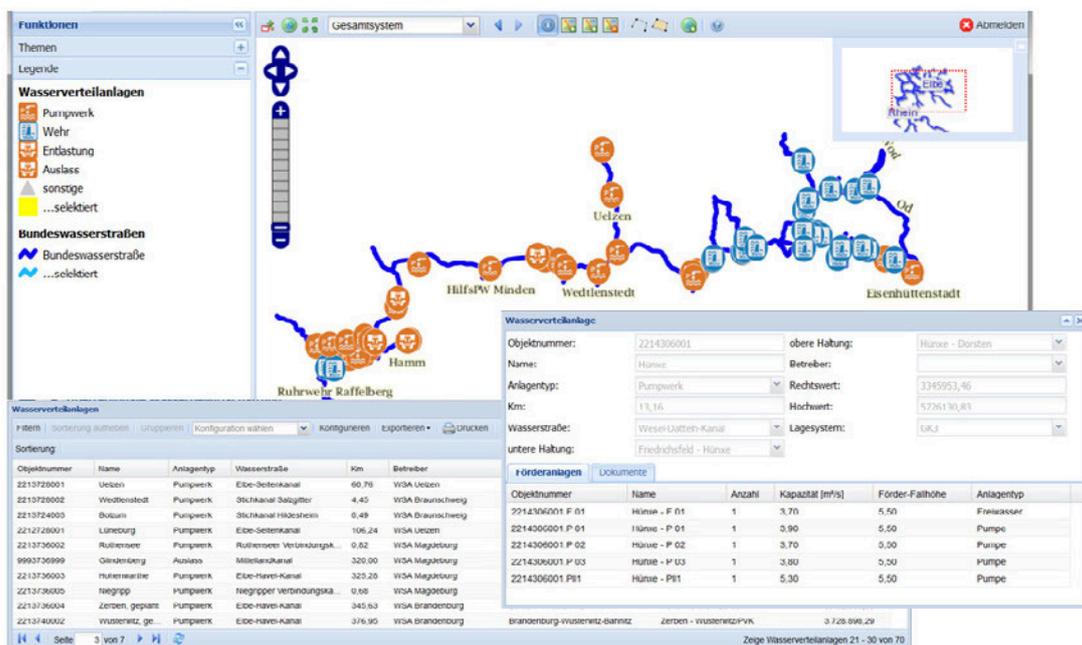


Abb. 3: Wasserverteilanlagen geografisch, tabellarisch und im Detail

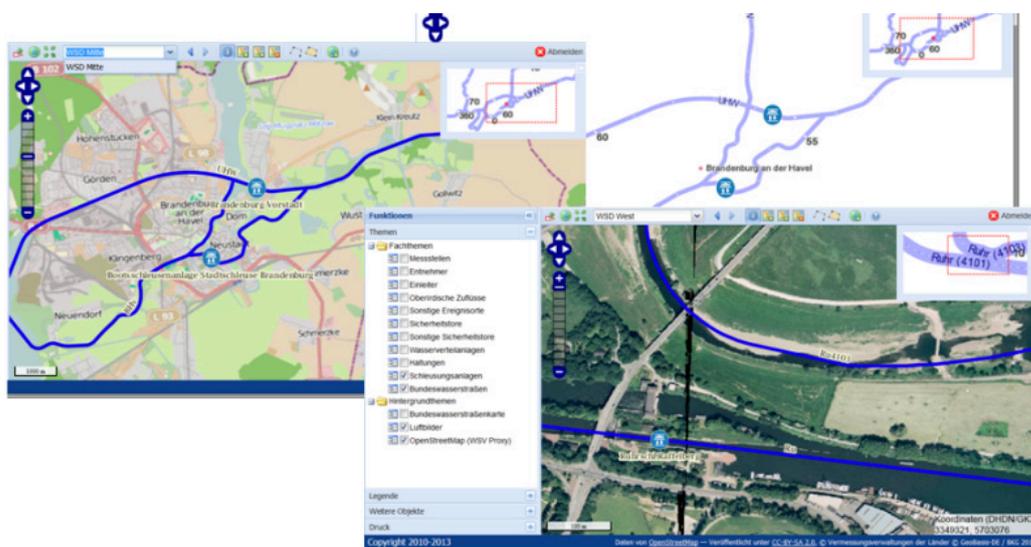


Abb. 4: Bundeswasserstraßenkarte, OpenStreetMap oder Luftbilder als Hintergrund

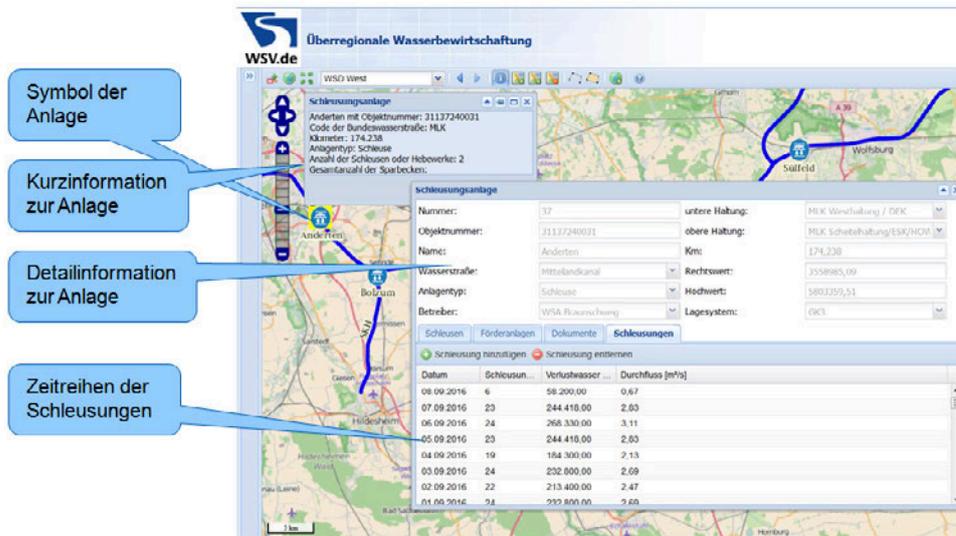


Abb. 5: Schleusen mit Schleusungen

Die Werte der Zeitreihen von Entnahmen und Einleitungen können tabellarisch und als Diagramm dargestellt werden. Von ÜWA aus kann je Messstelle direkt auf die Messwerte in PEGELONLINE zugegriffen werden. In ÜWA können Längsprofile definiert werden, die dann mit Hilfe von PEGELONLINE dargestellt werden können (Abb. 6).

ÜWA stellt verschiedene Berichte bereit, in denen die Bewirtschaftungsdaten und abgeleiteten Informationen wie Haltungsbilanzen detailliert oder aggregiert in unterschiedlichen Detaillierungsstufen aufgeführt sind und stellt die Defizitklassen der Haltungen als thematische Auswertung in der Karte dar (Abb. 7).

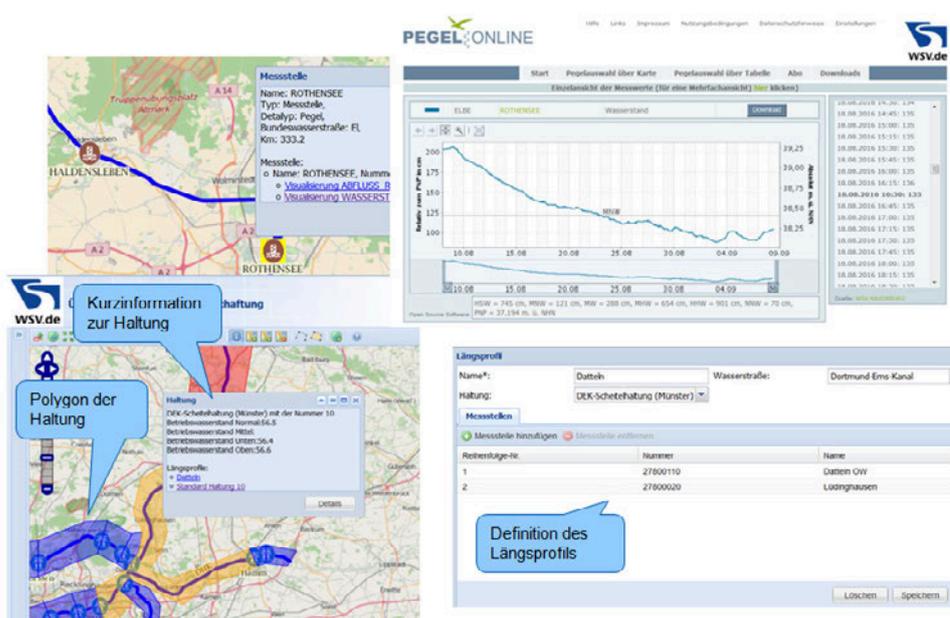


Abb. 6: Messwerte von Messstellen als Zeitreihe und als Längsprofil zu einer Haltung

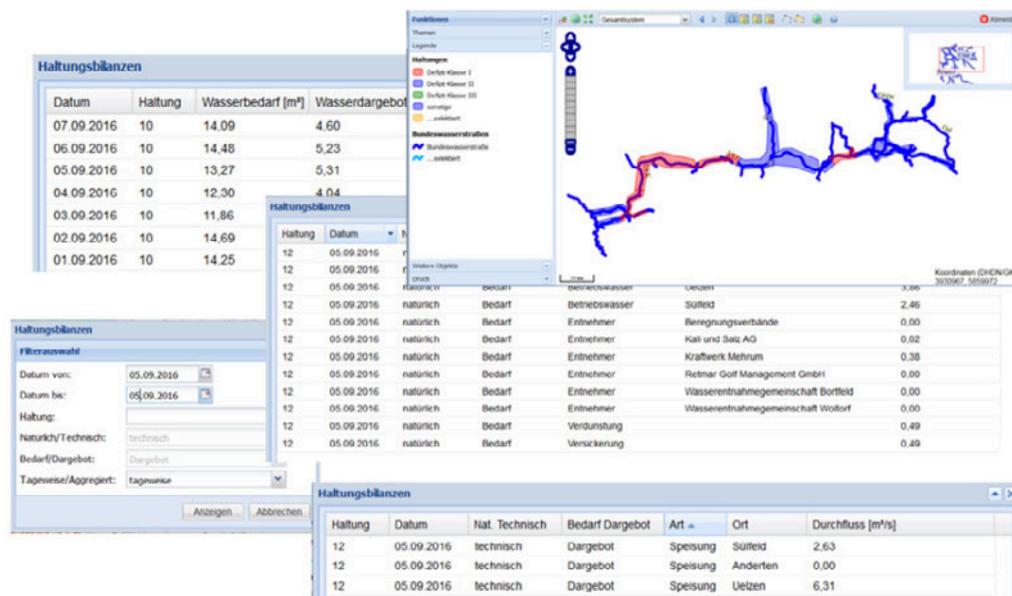


Abb. 7: Berichte und Auswertungen

## 2.5 Betrieb des Systems

Der Betrieb des Systems erfolgt beim ITZBund in Ilmenau und ist über ein Service Level Agreement (SLA) zwischen WSV und ITZBund geregelt.

Hergestellt wurde das System von der Fichtner IT Consulting AG (FIT) mit Hauptsitz in Stuttgart. FIT ist zuständig für die Weiterentwicklung des Systems und den Third Level Support.

Für den Betrieb legt das ITZBund besonderen Wert auf das technische Monitoring des Systems und die Sicherstellung der Ausfallsicherheit sowie auf die IT-Sicherheit und den Datenschutz.

## 3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit ÜWA steht der WSV ein leistungsfähiges Instrument zur Auskunft über Wasserbewirtschaftungsdaten zur Verfügung. Das System bietet die folgenden Vorteile:

- > Vereinfachung des überregionalen Informationsaustauschs durch die zentrale Verfügbarkeit räumlich verteilter und dezentral geführter Wasserbewirtschaftungsdaten
- > Vereinheitlichung der heterogenen Wasserbewirtschaftungsdaten durch strukturelle Angleichung der Daten aus verschiedenen Herkunftssystemen
- > Erleichterung der regional übergreifenden Wasserbewirtschaftung
- > verringerter Aufwand bei der Beschaffung kleinräumiger Wasserbewirtschaftungsdaten, insbesondere für BEWASYS (Simulation der Wassermengenbewirtschaftung durch die BfG)

Der besondere Nutzen von ÜWA besteht in der automatisierten Zusammenführung dezentral vorliegender Daten, deren Vereinheitlichung, Integration, Vernetzung, themenbezogenen Aufbereitung und Präsentation. Durch die erweiterbare Architektur des Systems können in

die Plattform ÜWA als Datendrehscheibe zukünftig weitere Daten und Themen aufgenommen werden. Damit können auch diese Daten nicht nur als Rohstoff sondern als Wissens- und Erkenntnisträger für die WSV genutzt werden.

## Literatur

- BMWi (2016): Digitale Strategie 2025. Hrsg.: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/digitale-strategie-2025.html> (letzter Zugriff 13.06.2017)
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D., M. CARAMBIA, J. HOHENRAINER, E. NILSON, K. RICHTER (2012): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels und veränderter Ansprüche der Nutzer auf die Bewirtschaftung des Westdeutschen Kanalsystems. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Überregionale Wasserbewirtschaftung – Entwicklung und Einsatz eines Informationssystems und verschiedener Modelle. Kolloquium am 12./13. Oktober 2012 in Hannover. – Veranstaltungen 2/2012, S. 42-53
- FW-Verlag GmbH (13.06.2016): Daten als Rohstoff der digitalen Gesellschaft, Deutsche Bank Gesprächsforum, Berlin, URL: <http://finanzwelt.de/daten-als-rohstoff-der-digitalen-gesellschaft/> (Stand 22.12.2016)
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Robert Bosch Stiftung (12.05.2016): Daten – Rohstoff der Zukunft?, Pressemitteilung, URL: <https://www.leopoldina.org/de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/press/2385> (Stand 22.12.2016)

### Kontakt:

#### Harald Roth

Fichtner IT Consulting AG

Sarweystr. 3

70191 Stuttgart

Tel.: 0711/ 8995 1441

E-Mail: [Harald.Roth@fit.fichtner.de](mailto:Harald.Roth@fit.fichtner.de)

# Amtliche Wasserstatistik – Ergebnisse und Methoden

Melanie Bodenseh

## 1 Einleitung

Von der amtlichen Statistik werden Daten zur Situation der Wasserwirtschaft in Deutschland erfasst. Im Folgenden werden die rechtlichen Grundlagen sowie die verschiedenen Erhebungen kurz vorgestellt. Außerdem wird die Durchführung einer Erhebung beschrieben, und es werden einige ausgewählte Ergebnisse vorgestellt. Die Veröffentlichungswege der amtlichen Statistik und die Verwendung der Daten werden dargestellt. Abschließend werden zwei Projekte aus dem Bereich der Statistiken der Wasserwirtschaft vorgestellt.

## 2 Statistiken der Wasserwirtschaft

### 2.1 Rechtliche Grundlage

Alle Erhebungen der amtlichen Statistik basieren auf einer gesetzlichen Grundlage. Für alle Erhebungen gilt grundsätzlich das Gesetz über die Statistik für Bundeszwecke (BStatG). Für die Statistiken der Wasserwirtschaft regelt zusätzlich das Umweltstatistikgesetz (UStatG) die Einzelheiten der verschiedenen Erhebungen. Es legt fest, wie häufig die Erhebungen durchgeführt werden, bestimmt den Berichtskreis, also wer befragt werden darf, sowie die zu erhebenden Merkmale.

### 2.2 Erhebungen

Die Statistiken der Wasserwirtschaft gliedern sich im Wesentlichen in einen öffentlichen und einen nichtöffentlichen Bereich.

Von den Erhebungen im öffentlichen Bereich werden folgende Punkte abgedeckt:

- > Anschlussgrade der Bevölkerung an die öffentlichen Wasserversorgung und die Abwasserbehandlung (Erhebung über die Wassereigenversorgung und -entsorgung privater Haushalte)
- > Angaben zur Wassergewinnung und Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung (Erhebung der öffentlichen Wasserversorgung)
- > Angaben zum Kanalnetz und zu Regenrückhalteanlagen (Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung)
- > Angaben zur Behandlung und Einleitung von Abwasser (Erhebung der öffentlichen Abwasserbehandlung)

- > Angaben zum Klärschlamm (Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung – Klärschlamm)
- > Angaben zu Entgelten, die für Frisch- und Abwasser erhoben werden (Erhebung der Wasser- und Abwasserentgelte)

Im nichtöffentlichen Bereich gibt es eine Erhebung von Angaben zur Wassergewinnung, zur Nutzung von Wasser sowie zur Behandlung und Einleitung von Abwasser und zum Klärschlamm (Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und der nichtöffentlichen Abwasserbeseitigung).

Durch weitere Erhebungen werden Angaben zu den Anlagen zum Umgang und den Unfällen mit wassergefährdenden Stoffen zusammengestellt (Erhebung der Anlagen/Unfälle mit wassergefährdenden Stoffen).

### **2.3 Durchführung**

Die Erhebungen der Statistiken der Wasserwirtschaft werden dezentral in den Statistischen Landesämtern durchgeführt. Hierbei handelt es sich größtenteils um primäre Statistiken. Dies bedeutet, dass in der Regel die Auskunftspflichtigen direkt befragt werden und keine Verwaltungsdaten o. ä. genutzt werden. Die Erhebungen werden alle drei Jahre durchgeführt. Lediglich die Erhebungen zum öffentlichen Klärschlamm und zu den Anlagen/Unfällen werden jährlich durchgeführt. Bei den Erhebungen handelt es sich in der Regel um Vollerhebungen. Bei der Erhebung im nichtöffentlichen Bereich kommt eine Abschneidegrenze zum Tragen, wodurch nicht alle Betriebe befragt werden. Die Erfassung der Daten erfolgt in der Regel mit Hilfe eines elektronischen Fragebogens über das Internet (IDEV = Internetdatenerhebung im Verbund).

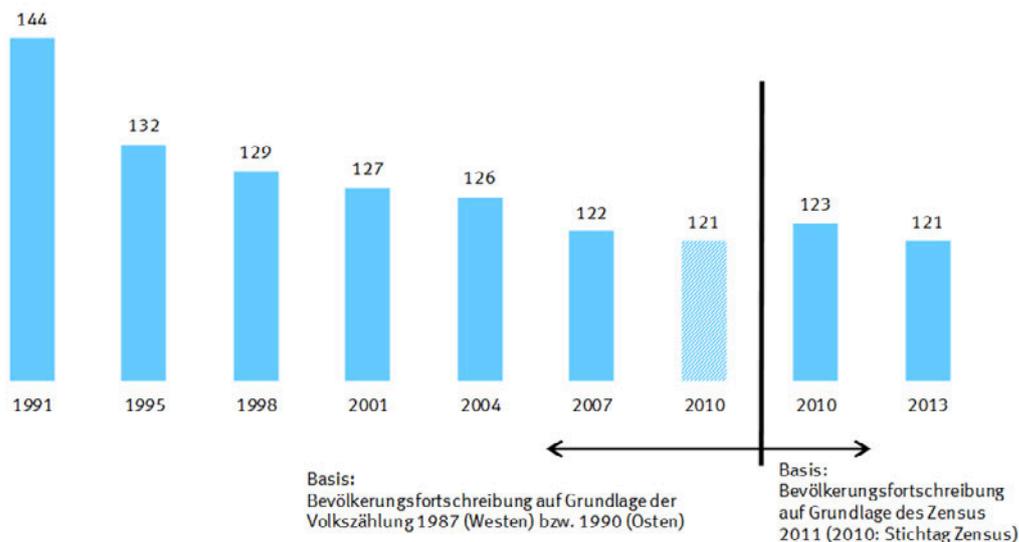
Die Erhebungsaufforderungen der meisten Erhebungen werden am Ende des Berichtsjahres von den Statistischen Landesämtern versendet. Der Rücklauf erfolgt im ersten und zweiten Quartal des Folgejahres. Die Ergebnisse werden aufwändig plausibilisiert, was zum Teil zeit- und aufwändige Rückfragen zur Folge hat. Die Ergebnisse der jährlichen Erhebungen liegen etwa elf bis zwölf Monate nach Ende des Berichtsjahres vor. Die Ergebnisse der 3-jährlichen Erhebungen liegen 18 bis 24 Monate nach Ende des Berichtsjahres vor.

### **2.4 Ausgewählte Ergebnisse**

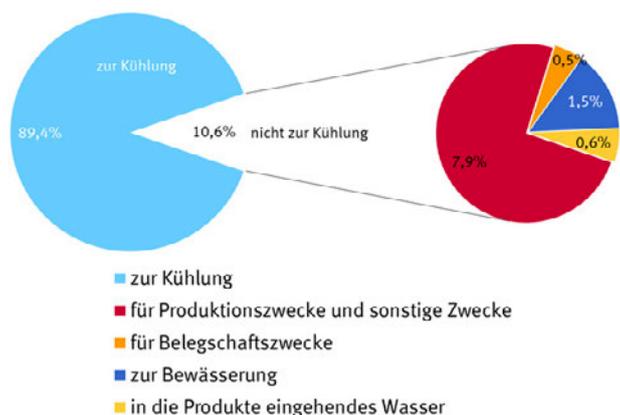
Um einen Eindruck über die Daten der amtlichen Statistik zu vermitteln, werden zwei ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

Im Jahr 2013 haben die Menschen in Deutschland tagtäglich rund 121 Liter Frischwasser gebraucht (Abb. 1). 1991 lag der Wassergebrauch noch bei 144 Litern je Einwohner. Seit dem hat der Wassergebrauch kontinuierlich abgenommen. Die dargestellte Zeitreihe weist einen Bruch auf, da die Bevölkerungsforschreibungen auf unterschiedlichen Grundlagen basieren: auf Grundlage der Volkszählung 1987 (alte Bundesländer) bzw. 1990 (neue Bundesländer) und auf Grundlage des Zensus 2011. Für das Jahr 2010 sind daher Ergebnisse auf beiden Grundlagen dargestellt.

Die im Jahr 2013 befragten nichtöffentlichen Betriebe haben etwa 19,6 Milliarden Kubikmeter Wasser eingesetzt. Der überwiegende Anteil des Wassers (89,4 %) wurde zur Kühlung eingesetzt. Das übrige Wasser wurde zu Produktions- und sonstigen Zwecken (7,9 %) eingesetzt, zur Bewässerung verwendet (1,5 %), ging in die Produkte ein (0,6 %) oder wurde für Belegschaftszwecke (0,5 %) gebraucht (Abb. 2).



**Abb. 1:** Öffentliche Wasserversorgung in Deutschland 1991 bis 2013 – Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe je Einwohner und Tag in Litern.  
(© Statistisches Bundesamt (Destatis), 2016)



**Abb. 2:** Nichtöffentliche Wasserversorgung in Deutschland 2013 – Wassereinsatz in nichtöffentlichen Betrieben nach Verwendungszweck in %.  
(© Statistisches Bundesamt (Destatis), 2016)

## 2.5 Veröffentlichung der Daten

Die Daten der amtlichen Wasserstatistik werden in den Fachserien 19 „Umwelt“, Reihen 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.2 und 2.3 veröffentlicht. Diese stehen auf der Homepage des Statistischen Bundesamtes ([www.destatis.de](http://www.destatis.de)) zur Verfügung. In der Datenbank Genesis-Online können ausgewählte Ergebnisse für die einzelnen Bundesländer und den Bund abgerufen werden (<https://www-genesis.destatis.de>). Tiefer gegliederte Ergebnisse, je nach Erhebung bis zur Kreis- oder Gemeindeebene stehen in der Regionaldatenbank Deutschland zur Verfügung (<https://www.regionalstatistik.de/genesis/online>). Des Weiteren veröffentlicht das Statistische Bundesamt jedes Jahr das Statistische Jahrbuch, in dem neben zahlreichen anderen Ergebnissen auch Daten der Wasserstatistiken enthalten sind. Zu den Daten einzelner Bundesländer gibt es vielfältige Veröffentlichungen der Statistischen Landesämter.

## 2.6 Verwendung der Daten

Die Daten der Wasserstatistiken werden u. a. für die Datenlieferung an Eurostat verwendet. Eurostat erhebt alle zwei Jahre mit Hilfe des „Joint Questionnaire on Inland Waters“ (JQ-IW) Angaben zur Wassergewinnung, Wassernutzung und zur Behandlung von Abwasser in Deutschland. Hierbei sollen Daten für jedes Jahr geliefert werden. Mit Hilfe des Regional Environmental Questionnaire (REQ) werden zeitgleich regionalisierte Angaben zur Wassergewinnung und zur Wassernutzung abgefragt. Die Daten werden im REQ nach Flussgebietseinheiten und Subunits gegliedert.

### 2.6.1 Gap-filling-Projekt

Eurostat erhebt mit dem JQ-IW und dem REQ Angaben für jedes Jahr. Die meisten der Erhebungen, die für die Befüllung des JQ-IW und des REQ benötigt werden, werden aber durch die amtliche Statistik für Deutschland nur alle drei Jahre durchgeführt. Dadurch bestehen zeitliche Lücken in den Datenlieferungen an Eurostat. Außerdem decken die Erhebungen nicht alle von Eurostat geforderten Merkmale ab. Mit Hilfe des von Eurostat geförderten Projektes „Gap-filling in German water statistics“ wurde versucht, diese Lücken zu schließen.

Zunächst wurden Datenquellen außerhalb der amtlichen Statistik daraufhin geprüft, ob damit Lücken in den Datenlieferungen an Eurostat geschlossen werden können. Aufgrund zahlreicher nationaler und internationaler Gesetze und Richtlinien werden Angaben zur Wassergewinnung, Wassernutzung und Abwasserbehandlung erhoben. Auf nationaler Ebene werden beispielsweise Daten aufgrund des Wasserentnahmeentgelts, der Abwasserabgabe und der Eigenkontrolle erhoben. Außerdem gibt es in vielen Bundesländern spezifische Fachinformationssysteme, in denen wasserbezogene Daten gesammelt werden. Im Zuge supranationaler Gesetzgebung werden Daten auf Basis der Wasserrahmenrichtlinie, des Pollutant Release and Transfer Register (PRTR), der Trinkwasserrichtlinie und der Kommunalabwasserrichtlinie erhoben. Es existieren also umfangreiche Datenbestände außerhalb der amtlichen Statistik. Diese Datenbestände weisen allerdings gewisse Einschränkungen auf, die ihre Nutzbarkeit für die Datenlieferung an Eurostat einschränkt. Die erfassten Daten weisen beispielsweise Abschneidegrenzen auf, so dass nicht zu allen benötigten Einheiten Daten vorliegen. Eine weitere Einschränkung der Daten besteht darin, dass die aufgrund nationaler Gesetze erhobenen Daten nicht in allen Bundesländern in gleicher Form erhoben werden. So wird beispielsweise nicht in allen Bundesländern ein Entgelt für die Entnahme von Wasser erhoben, bzw. die Angaben, die erhoben werden, unterscheiden sich stark zwischen den einzelnen Bundesländern. Zudem werden die Angaben häufig nicht zentral sondern dezentral erfasst, so dass häufig auch in den einzelnen Bundesländern keine zentralen Datensätze vorliegen. Im Rahmen des Projektes konnten daher keine Datenbestände außerhalb der amtlichen Statistik identifiziert werden, die für die Ergänzung der zeitlichen Lücken in den Datenlieferungen an Eurostat geeignet sind.

Um dennoch zeitliche Lücken in den Datenlieferungen schließen zu können, wurden verschiedene Schätzmethoden entwickelt und getestet. Als geeignet erwiesen sich Interpolationen für Merkmale, die nicht stark von äußeren Faktoren beeinflusst werden. Ein Beispiel hierfür sind die Anschlussgrade der Bevölkerung an die öffentliche Wasserversorgung oder die Kanalisation. Merkmale, die von äußeren Faktoren beeinflusst werden, wurden mit Hilfe von verschiedenen erklärenden Variablen geschätzt. Für die verschiedenen Bereiche des Ver-

arbeitenden Gewerbes erwies sich beispielsweise der Umsatz aus dem Monatsbericht für Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden als geeignet.

### **2.6.2 Harmonisierungs-Projekt**

Durch das Gap-filling-Projekt wurde deutlich, dass zahlreiche größtenteils parallel verlaufende Datenerhebungen im Bereich Wasser existieren. Daher werden in einem aktuell laufenden und von Eurostat finanzierten Projekt diese parallel laufenden Erhebungen näher untersucht mit dem Ziel, die Doppelerhebungen möglichst abzubauen. Im Detail werden die Erhebung der öffentlichen Abwasserbehandlung, die Kommunalabwasserrichtlinie und die Eigenkontrolle betrachtet. Diese weisen zum Teil voneinander abweichende Ergebnisse auf, so dass momentan auf EU-Ebene voneinander abweichende Ergebnisse vorliegen. Eurostat erhält Angaben zur öffentlichen Abwasserbehandlung aus der Erhebung der öffentlichen Abwasserbehandlung der amtlichen Statistik. Das Umweltbundesamt liefert Daten auf Basis der Kommunalabwasserrichtlinie an die EU-Kommission nach Brüssel. Bisher laufen diese beiden Berichtswege weitestgehend parallel. In Kooperation mit dem Umweltbundesamt, verschiedenen Landesumweltämtern und Statistischen Landesämtern wird versucht, die Berichtspflichten zu harmonisieren und im Idealfall Doppelerhebungen abzubauen.

## **Literatur**

- BODENSEH, M. (2015): Final report for the action „Gap-filling in German water statistics“, Contract number: 50303.2012.001-2012.551, Statistisches Bundesamt (Destatis).
- BODENSEH, M. (2016): Interim report for the action „Harmonising German Water reporting to the EU“, Contract number: 08233.2014.001-2014.653, Statistisches Bundesamt (Destatis).
- BStatG – Gesetz über die Statistik für Bundeszwecke (Bundesstatistikgesetz) vom 22.01.1987 (BGBl. I S. 462, 565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Juli 2016 (BGBl. I S. 1768) geändert worden ist.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2015): Qualitätsbericht – Erhebung der öffentlichen Wasserversorgung und öffentlichen Abwasserentsorgung 2013.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2016): Qualitätsbericht – Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und der nichtöffentlichen Abwasserentsorgung 2013.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2016): Qualitätsbericht – Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung – Klärschlamm 2014.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2016): Qualitätsbericht – Erhebung der Unfälle mit wassergefährdenden Stoffen 2015.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2016): Fachserie 19, Reihe 2.1.1 – Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung – Öffentliche Wasserversorgung 2013.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2016): Fachserie 19, Reihe 2.2 – Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserentsorgung 2013.
- UStatG – Umweltstatistikgesetz vom 16. August 2005 (BGBl. I S. 2446), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S 1839) geändert worden ist.

**Kontakt:**

**Melanie Bodenseh**

Statistisches Bundesamt

Statistiken der Wasserwirtschaft und der klimawirksamen Stoffe

Graurheindorfer Straße 198

53117 Bonn

Tel.: 0228/ 99 643 8171

E-Mail: [melanie.bodenseh@destatis.de](mailto:melanie.bodenseh@destatis.de)

# Szenarien zur Wassernutzung – projektspezifische Erfahrungen und Erkenntnisse

Katharina Richter

## 1 Einleitung

Die Bewirtschaftung eines wasserwirtschaftlichen Systems ist geprägt von dem zur Verfügung stehenden Wasserdargebot und dem sich aus Nutzungen ergebenden Wasserbedarf. Beide Größen unterliegen zeitlichen Schwankungen und sind räumlich unterschiedlich verteilt. Das kann dazu führen, dass der Wasserbedarf nicht zu allen Zeiten durch das Wasserdargebot gedeckt wird. Um ein System dennoch optimal bewirtschaften zu können, ist deshalb häufig eine zeitliche und räumliche Umverteilung des zur Verfügung stehenden Wassers erforderlich. Ändern sich das Wasserdargebot (z. B. durch den Klimawandel) und/oder die Nutzungsbedingungen innerhalb eines Systems, ändern sich auch die Randbedingungen der Bewirtschaftung. Dies kann sowohl lokale als auch regionale oder überregionale Auswirkungen zur Folge haben. Eine Möglichkeit, diese Auswirkungen im Vorfeld zu prüfen und abzuschätzen, ist die Verwendung von Szenarien.

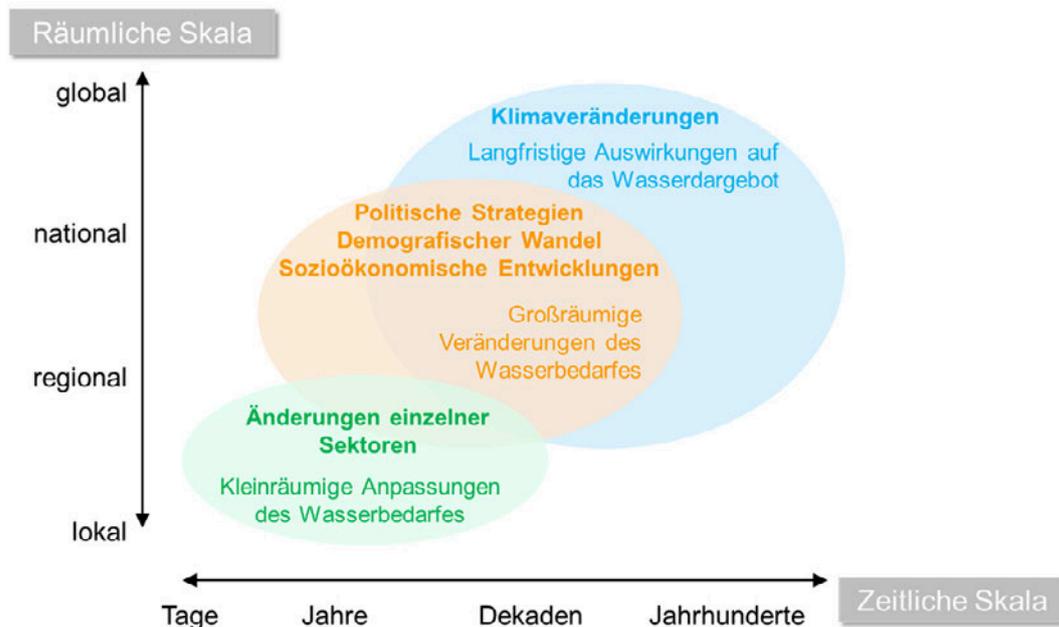
Der vorliegende Beitrag soll einen Überblick geben über die Anwendungsmöglichkeiten von Szenarien im Bereich der Wasserbewirtschaftung (Kapitel 2) und beispielhaft Ergebnisse von Szenarienberechnungen zeigen, die im Rahmen zweier aktuell in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bearbeiteter Projekte gewonnen wurden (Kapitel 3). In einem Fazit sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst (Kapitel 4).

## 2 Szenarien – Anwendungsgebiete und Ziele

Ein „Szenario“ dient laut Anlehnung an GABLER (2013) dazu, die Aufmerksamkeit auf kausale Prozesse und Entscheidungspunkte zu lenken. Dazu werden – bezogen auf unterschiedliche Zeitperioden – Annahmen zu Ereignissen und deren mögliche Entwicklungen und Abhängigkeiten getroffen.

Szenarien können also auf sehr unterschiedlichen Betrachtungsebenen angesiedelt werden und damit sowohl räumlich als auch zeitlich unterschiedliche Skalenbereiche betreffen.

In Abb. 1 sind einige mögliche Untersuchungsschwerpunkte, wie z. B. Klimaveränderungen, politische Strategien/demografischer Wandel oder sektorielle Änderungen und deren Auswirkungen auf die Wasserbewirtschaftung mit ihrem Skalenbezug dargestellt.



**Abb. 1:** Einordnung möglicher Szenarieninhalte und deren Auswirkungen auf die Wasserbewirtschaftung in die zeitliche und räumliche Skala; modifiziert nach CASH et al. (2006)

Die Untersuchungen kleinräumiger Anpassungen des Wasserbedarfes, wie sie durch die Änderung einzelner Sektoren (Nutzungen, Bewirtschaftungsvorgaben oder ähnliches) erforderlich werden, finden eher standortbezogen (lokal bis regional) statt und haben einen kürzeren Zeitbezug (Tage bis Dekaden). Bei der Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen, wie z. B. politischer Strategien, Untersuchungen zum demografischen Wandel oder zu sozioökonomischen Entwicklungen geht es dagegen oftmals um die Betrachtung großräumiger Veränderungen des Wasserbedarfes auf regionaler bis nationaler oder auch internationaler Ebene. Untersuchungen von Klimaänderungen und ihrer möglichen langfristigen Auswirkungen auf das Wasserdargebot schließlich ermöglichen einen Ausblick bis in die ferne Zukunft und umfassen eher einen regionalen bis globalen Bereich.

Je nach inhaltlicher Fragestellung dienen Szenarien unterschiedlichsten Zielen.

Bezogen auf die hier im Vordergrund stehenden wasserwirtschaftlichen Systeme (Flussabschnitte oder -einzugsgebiete, Kanäle oder Kanalsysteme) können drei Schwerpunkte definiert werden:

- > **Prüfung der Betriebssicherheit** zur Beantwortung der Frage, wie ein System auf **existierende Randbedingungen** reagiert
- > **Planung von Betriebsabläufen** zur Untersuchung möglicher Auswirkungen **geänderter Randbedingungen** auf ein System
- > **Abschätzung von Risiken** zur Feststellung der Belastbarkeit eines Systems durch die Definition **extremer Randbedingungen**

Die Formulierung der Zielvorgabe ist somit eng verknüpft mit der Festlegung der Randbedingungen, die je nach Fragestellung vom Systembetreiber bzw. den Akteuren innerhalb des Systems (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), Verbände, ...)

vorgegeben oder aber im Rahmen der Untersuchungen aus der vorliegenden Datenlage z. B. aus der Literatur (Klimastudien, Versorgungskonzepte, ...) oder anhand von Modellergebnissen (z. B. Klima, Hydrologie) bestimmt werden können.

Die inhaltliche Fragestellung bestimmt auch das Auswertungskonzept der Szenarien, wobei sich verschiedene räumliche und zeitliche Betrachtungsebenen für die Auswertung ergeben können:

> **Raumbezug**

- Standorte (z. B. Schleusen)
- Teilabschnitte (z. B. Kanalabschnitte)
- gesamtes System (z. B. Einzugsgebiete)

> **Zeitbezug**

a) Eingangsdaten

- Tageswerte (z. B. Wasserstände)
- Monatswerte (z. B. Nutzerdaten, wie Entnahmen oder Rückleitungen)
- Jahreswerte (z. B. Pumpkosten)

b) Bezugszeiträume

- Tage (z. B. zur Überprüfung der Stauzieleinhaltung)
- Jahreszeiten (z. B. bei der Auswertung von Berechnungsperioden)
- Jahre/Dekaden (z. B. zur Abschätzung möglicher Auswirkungen von Klimaänderungen).

Einen besonderen Stellenwert nehmen in diesem Zusammenhang die zur Verfügung stehenden Eingangsdaten ein, deren zeitliche Auflösung der des interessierenden Bezugszeitraumes entsprechen sollte. Im Beitrag von HOHENRAINER (2017, s. S. 32ff.) wird dieser Aspekt deshalb gesondert beleuchtet.

### **3 Anwendungsbeispiele für Wassernutzungsszenarien**

Im Rahmen von Aufträgen der WSV bearbeitet die BfG zahlreiche Fragestellungen, deren Beantwortung Szenarienrechnungen erforderlich machen.

Unter der Prämisse der Gewährleistung von Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt steht hier insbesondere die Deckung des Wasserbedarfes des jeweils betrachteten Systems im Fokus der Untersuchungen. Das Spektrum der bearbeiteten Themen reicht dabei von Untersuchungen auf lokaler Ebene, z. B. zur Ableitung von Steuerregeln (z. B. von Kanalabschnitten) bis hin zu großräumigen Untersuchungen zur Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf das Wasserdargebot (z. B. EBNER VON ESCHENBACH et al. 2012).

Die in diesem Beitrag vorgestellten Projekte sind Beispiele für die Anwendung von Szenarien auf lokaler bzw. regionaler Ebene aus den Sektoren Schifffahrt und Landwirtschaft.

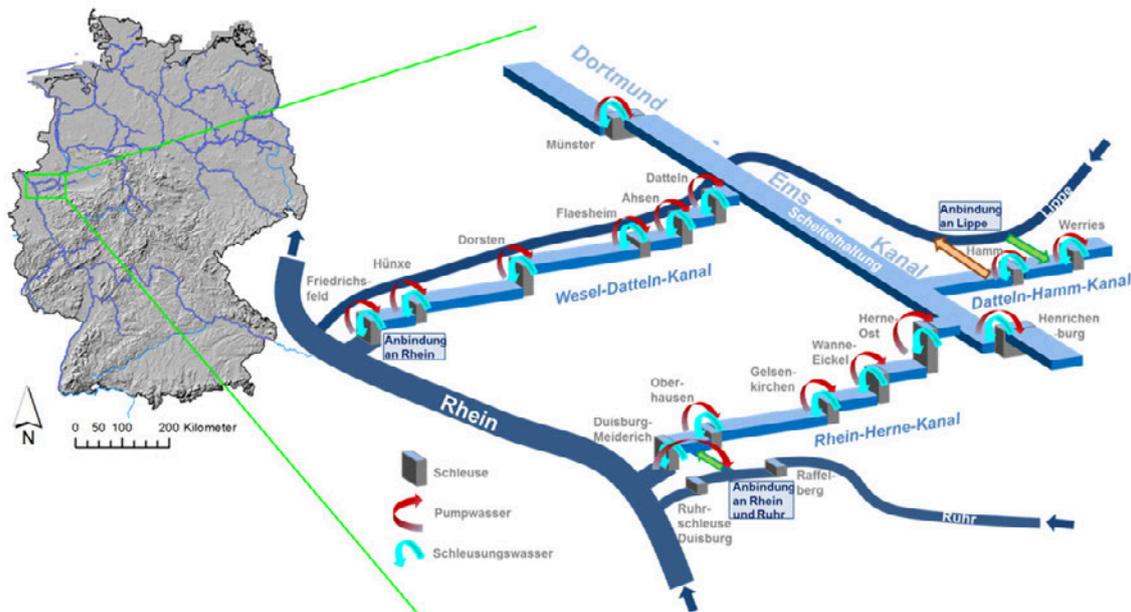
Die Durchführung der Szenarienrechnungen erfolgte mit dem Bewirtschaftungsmodell BEWASYS Rhein-Oder, welches die Wassermengenbewirtschaftung der Kanal- und Flusstauhaltungen zwischen Rhein und Oder auf Tageswertbasis simuliert (EBNER VON ESCHENBACH et al. 2011).

### 3.1 Änderungen von Pumpkapazitäten im westdeutschen Kanalsystem bis Münster

Das westdeutsche Kanalsystem wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts angelegt, um für die Montanindustrie des Ruhrgebietes Transportwege zur Nordsee und zum Rhein zu schaffen. Das Untersuchungsgebiet umfasst den südlichen Teil dieses westdeutschen Kanalsystems und erstreckt sich in west-östlicher Richtung vom Rhein bis zur Lippe bei Hamm und von Süd nach Nord von der Ruhr bis Münster. Das aus Rhein-Herne-Kanal (RHK), Wesel-Datteln-Kanal (WDK), Datteln-Hamm-Kanal (DHK) und Dortmund-Ems-Kanal (DEK) bis zur Schleuse Münster bestehende System umfasst eine Länge von ca. 260 km.

Der Wesel-Datteln-Kanal und der Rhein-Herne-Kanal sind die am stärksten befahrenen Binnenschiffahrtskanäle Deutschlands. Sie verbinden nicht nur die Industriezentren des Ruhrgebietes mit den Überseehäfen an der Rheinmündung, sondern sind auch Verkehrsweg für die Transitverkehre vom Rhein Richtung Ems, Weser, Elbe und Oder. Zudem dienen diese von der WSV bewirtschafteten Kanäle der industriellen und öffentlichen Wasserversorgung der Region (ECKOLD 1998, WSA Duisburg-Meiderich 2016).

Der hier zu untersuchende Abschnitt des wasserwirtschaftlichen Systems umfasst 13 Stauhaltungen, die über insgesamt 15 Schleusen miteinander verbunden sind (siehe Abb. 2). Entsprechend der Hauptnutzung des Kanalsystems als Schifffahrtsweg ist das Ziel der Bewirtschaftung die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs unter Berücksichtigung aller weiteren Nutzungen. Der sich daraus ergebende Wasserbedarf überschreitet zumeist das zur Verfügung stehende Wasserdargebot, so dass die Einhaltung dieses Zieles nur möglich ist, wenn das Kanalsystem zusätzlich mit Wasser (von außerhalb des Systems) versorgt wird. Wichtigste Speisungsquellen sind hier die Lippe, die Westhaltung des Mittellandkanals sowie die untere Ruhr und der Rhein. Dabei läuft nur das Wasser der Lippe dem Kanalsystem im freien Gefälle zu. Die Versorgung der Stauhaltungen aus Mittellandkanal, Ruhr und Rhein erfolgt bei Bedarf über das Pumpen von Wasser am Standort Münster bzw. über die Pumpwerkskette des RHK und des WDK (Abb. 2).



**Abb. 2:** Systemskizze des westdeutschen Kanalsystems bis Münster mit Schleusen (Blickrichtung aus Süden). Dargestellt sind auch die Richtungen, in denen Wasser an den jeweiligen Schleusenstandorten gepumpt wird (rote Pfeile) bzw. in die das Schleusungswasser abfließt (blaue Pfeile).

Die hier vorgestellten Berechnungen erfolgten im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) Duisburg-Meiderich zur Untersuchung der Auswirkungen des Neubaus der Schleusenammer Nord am Standort Wanne-Eickel auf die Auslastung der Pumpwerksketten des westdeutschen Kanalsystems bis zum Standort Münster, der im Zeitraum 2015 bis 2016 von der BfG bearbeitet wurde (WSA Duisburg-Meiderich 2014).

Die Notwendigkeit der Untersuchung der Auswirkungen geänderter Pumpkapazitäten ergibt sich aus dem Umstand, dass nicht alle der an den Schleusenstandorten vorhandenen Pumpen allein für die Deckung des Wasserbedarfes der Schifffahrt zur Verfügung stehen, sondern auch anderen Nutzungszwecken wie z. B. dem Lippeverband zur Anreicherung der Lippe in Niedrigwasserzeiten oder dem Verband der Westdeutschen Känale (WWK) dienen. Dies betrifft insbesondere die Pumpwerke am Rhein-Herne-Kanal. So sind an den Standorten Oberhausen, Gelsenkirchen, Wanne-Eickel und Herne-Ost jeweils nur zwei und am Standort Duisburg-Meiderich keine der dort vorhandenen Pumpen ausschließlich für den Ausgleich von Schleusungswasserverlusten durch die WSV vorgesehen. Eine dritte Pumpe ist an den Standorten Oberhausen, Gelsenkirchen, Wanne-Eickel und Herne-Ost derzeit zusätzlich von der WSV für die Belange der Schifffahrt angemietet.

Aus dem nutzungsabhängigen Einsatz der Pumpen ergibt sich für den Betreiber die Fragestellung, ob die derzeit für Schifffahrtzwecke vorgesehene Pumpkapazität ausreicht, um den sich aus der Schifffahrt ergebenden Wasserbedarf durchgehend zu decken.

Zur Beantwortung dieser Frage wurde die modelltechnische Annahme getroffen, dass im Rahmen der Bewirtschaftung nur der Schifffahrtsbetrieb berücksichtigt wird. Die Vernachlässigung aller weiteren Nutzungen bedeutet dabei gleichzeitig, dass keine Stützung des Kanalsystems mit Wasser aus der Lippe erfolgt, sondern nur über das Pumpen von Wasser über den Standort Münster sowie über die Pumpwerksketten des RHK und des WDK. Darauf aufsetzend wurden, ausgehend vom geplanten zukünftigen Zustand der Schleuse in Wanne-Eickel mit zwei Kammern, folgende Szenarien entwickelt:

- (1) **Einsatz aller an den Standorten betriebenen Pumpen** unter Berücksichtigung des (n-1)-Falls (jeweils eine der vorhandenen Pumpen dient nur als Reservepumpe; am Standort Duisburg-Meiderich betrifft dies zwei Pumpen; am Standort Hamm gibt es keine diesbezügliche Einschränkung)
- (2) **Einsatz aller der Schifffahrt gewidmeten Pumpen:** zwei WSV-Pumpen und optionale Zuschaltung einer dritten Pumpe (angemietet) an den Standorten Oberhausen, Gelsenkirchen, Wanne-Eickel und Herne-Ost; keine Pumpe am Standort Duisburg-Meiderich
- (3) **Einsatz nur der WSV-Pumpen:** zwei Pumpen an den Standorten Oberhausen, Gelsenkirchen, Wanne-Eickel und Herne-Ost; keine Pumpe am Standort Duisburg-Meiderich

In Tabelle 1 ist angegeben, welche Pumpkapazitäten unter diesen Randbedingungen an den Standorten zur Verfügung stehen. Wie zu erkennen ist, betreffen die nutzungsbedingten Einschränkungen ausschließlich die Standorte des Rhein-Herne-Kanals.

**Tabelle 1**

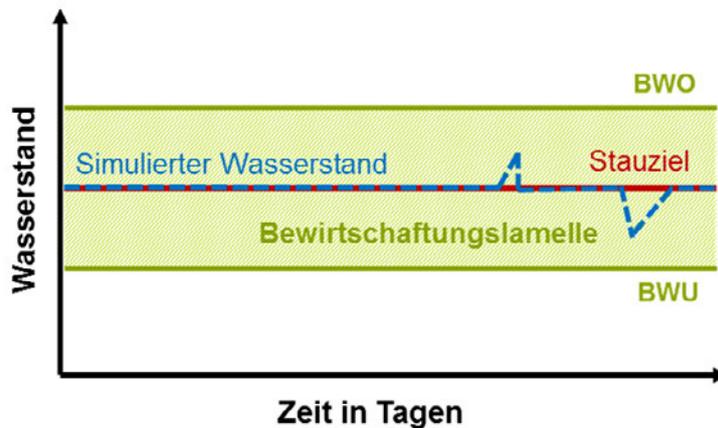
Nutzungsabhängige Pumpkapazitäten an den Schleusenstandorten des Untersuchungsgebietes. Für RHK und WDK sind jeweils die Werte für den Standort mit der kleinsten und der größten Pumpkapazität angegeben.

Kanal/Standort	Pumpkapazitäten in m <sup>3</sup> /s		
	(1) alle betriebenen Pumpen	(2) nur Schifffahrts-pumpen	(3) nur WSV-Pumpen
RHK / alle	zwischen 11 und 22,8	zwischen 0 <sup>*)</sup> und 15,3	zwischen 0 <sup>*)</sup> und 10,3
WDK / alle	zwischen 11,1 und 19,6		
DEK / Münster	8		
DHK / Hamm	2		

<sup>\*)</sup> gilt nur für Duisburg-Meiderich

Die Berechnungen erfolgten über einen Zeitraum von 10 Jahren (11/2003 bis 10/2013) in Tageszeitschritten.

Unter Berücksichtigung des primären Bewirtschaftungsziels, der Gewährleistung von Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs, dienen als Prüfgröße die Wasserstände in den einzelnen Stauhaltungen. Das Bewirtschaftungsziel gilt als erreicht, wenn das gesteuerte Stauziel (Betriebswasserstand) eingehalten werden kann, bzw. sich der unter den jeweiligen Randbedingungen einstellende Wasserstand innerhalb einer vorgegebenen Bewirtschaftungslamelle zwischen oberem (BWO) und unterem Betriebswasserstand (BWU) bewegt (Abb. 3).



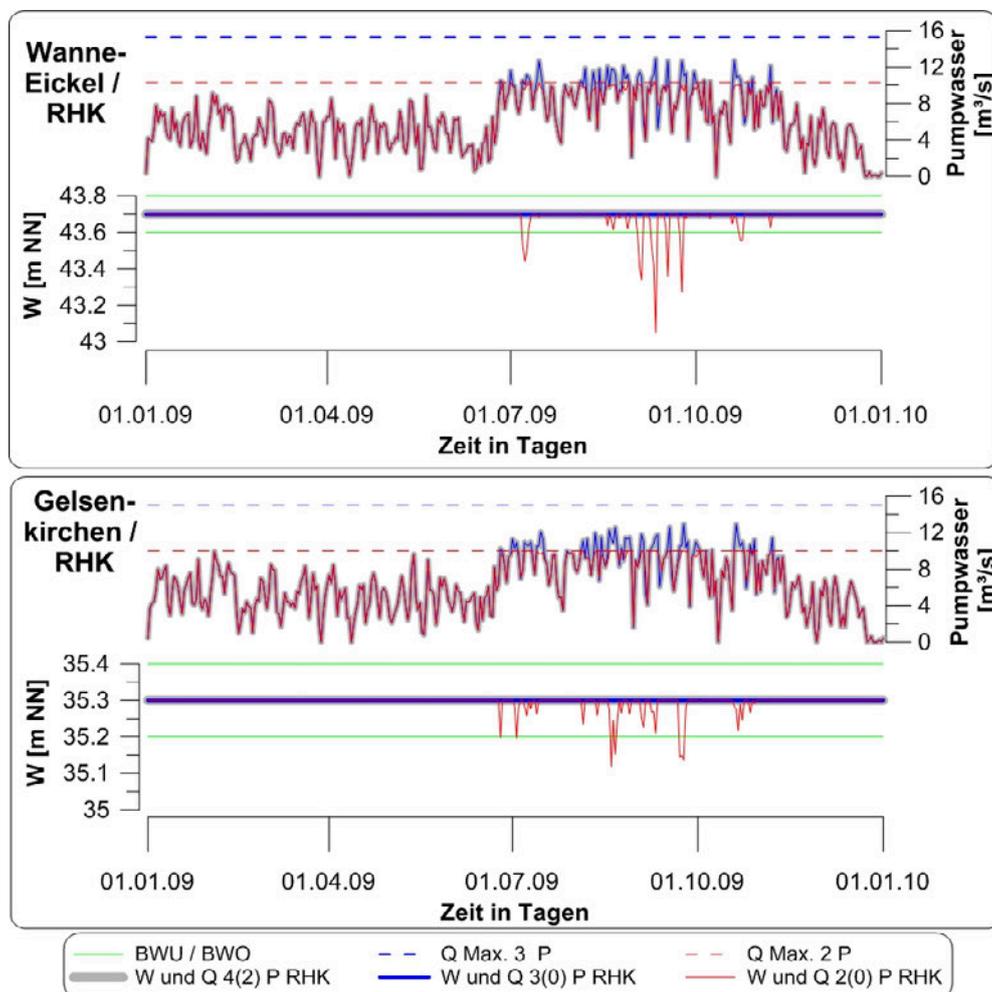
**Abb. 3:** Darstellung der Bewirtschaftungslamelle (grün markierter Bereich) zwischen BWU und BWO mit angestrebtem Stauziel (rote Ganglinie). Liegt der simulierte Wasserstand (blaue Ganglinie) innerhalb der Bewirtschaftungslamelle, ist das Bewirtschaftungsziel erreicht.

Mit Hilfe der untersuchten Szenarien konnte festgestellt werden, inwieweit diese Forderung unter den verschiedenen Randbedingungen eingehalten werden kann.

Folgende Aussagen können dazu getroffen werden:

- (1) Bei Einsatz aller an den Standorten unter Berücksichtigung des (n-1)-Falls betriebenen Pumpen wird das angestrebte Stauziel durchgehend in allen Stauhaltungen erreicht.

- (2) Stehen zur Deckung des Wasserbedarfes der Stauhaltungen des Untersuchungsgebietes alle der Schifffahrt gewidmeten Pumpen zur Verfügung, verletzt der sich einstellende Wasserstand ebenfalls nicht die Grenzen der Bewirtschaftungslamelle. Der untere Betriebswasserstand wird zu keinem Zeitpunkt und in keiner Stauhaltung unterschritten.
- (3) Wird die Pumpkapazität auf die WSV-eigenen Pumpen (Gesamtkapazität von jeweils nur ca. 10 m<sup>3</sup>/s an den Standorten Oberhausen, Gelsenkirchen, Wanne-Eickel und Herne-Ost) reduziert, führt dies in den Stauhaltungen Wanne-Eickel und Gelsenkirchen (Rhein-Herne-Kanal) an mehreren Tagen im Untersuchungszeitraum zu deutlichen Unterschreitungen des unteren Betriebswasserstandes, da die Schleusungswasserverluste über die vorhandenen Pumpen nicht ausgeglichen werden können. In allen anderen Haltungen wird der untere Betriebswasserstand auch hier nicht unterschritten.



**Abb. 4:** Darstellung der sich für den Ausgangszustand (4(2) P RHK) und zwei Berechnungsszenarien (3(0) bzw. 2(0) P RHK) einstellenden Wasserstände W (jeweils untere Ganglinien) in Abhängigkeit vom simulierten Pumpwasser (jeweils obere Ganglinien) für die Standorte Wanne-Eickel und Gelsenkirchen beispielhaft für den Zeitraum 01.01. bis 31.12.2009. Die in Klammern gesetzten Zahlen entsprechen der Pumpenzahl am Standort Duisburg-Meiderich.

Abbildung 4 zeigt für den Beispielszeitraum eines Jahres (2009) die Auswirkungen der Reduzierung der Pumpkapazitäten für die Stauhaltungen Wanne-Eickel und Gelsenkirchen. Es wird deutlich, dass die maximale Pumpkapazität nicht ausgeschöpft wird, wenn alle der Schifffahrt gewidmeten Pumpen (3 P, blau gestrichelte Ganglinien) in Betrieb sind. Stehen nur noch die WSV-Pumpen (2 P, rot gestrichelte Ganglinie) zur Verfügung, reicht die vorhandene Pumpkapazität nicht mehr, um den Wasserbedarf der Haltungen durchgehend zu decken. Der sich einstellende Wasserstand unterschreitet die Bewirtschaftungslamelle (grün gekennzeichnet) immer dann, wenn der Bedarf an Pumpwasser die Kapazitätsgrenze der zur Verfügung stehenden Pumpen erreicht.

Das bedeutet, dass an den Standorten Oberhausen, Gelsenkirchen, Wanne-Eickel und Herne-Ost nur zwei Pumpen mit einer Gesamtkapazität von je ca. 10 m<sup>3</sup>/s nicht ausreichen, um den von der Schifffahrt benötigten Wasserbedarf der Haltungen jederzeit vollständig decken zu können.

### **3.2 Änderung landwirtschaftlicher Entnahmen aus dem Elbe-Seitenkanal und der Scheitelhaltung des Mittellandkanals**

Die im zweiten Anwendungsbeispiel vorgestellten Szenarienrechnungen wurden im Rahmen des Auftrages der Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter Uelzen und Braunschweig von der BfG durchgeführt (HOHENRAINER & EBNER VON ESCHENBACH 2016). Veranlassung für diesen Auftrag war das Bestreben der Beregnungsverbände, aufgrund der Ausschöpfung der derzeit festgelegten Entnahmeobergrenzen die landwirtschaftlichen Entnahmemengen aus dem Elbe-Seitenkanal (ESK) und der Scheitelhaltung des Mittellandkanals (MLK) für die Feldberegnung zu erhöhen.

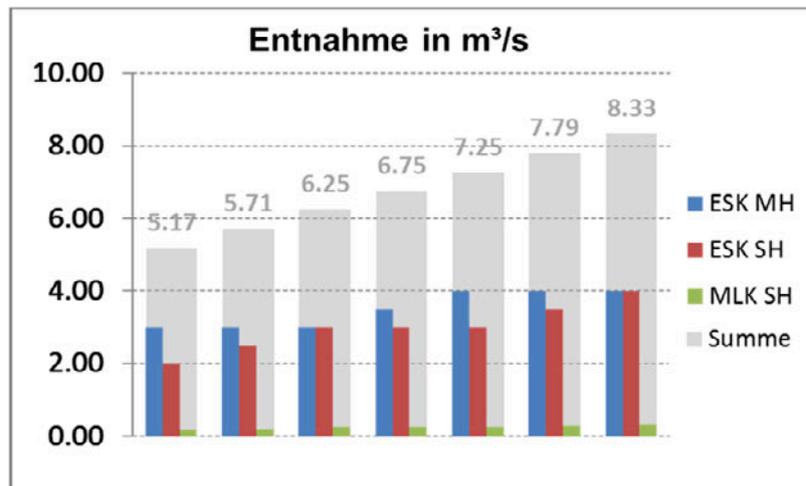
Das für diese Aufgabenstellung zu untersuchende Gebiet umfasst den rund 115,2 km langen Elbe-Seitenkanal, ausgehend von der Scheitelhaltung des Mittellandkanals bis zur Elbe (Schleuse Lüneburg) sowie den Abschnitt des Mittellandkanals zwischen der Schleuse Minden im Westen und der Schleuse Rothensee im Osten mit der Scheitelhaltung zwischen den Schleusen Anderten und Sülfeld als Mittelstück mit einer Länge von 62,7 km.

Auf eine detaillierte Gebietsbeschreibung wird an dieser Stelle mit Verweis auf den Beitrag von Hohenrainer (2017, s. S. 32ff.) verzichtet.

Auch die Bewirtschaftung der Bundeswasserstraße Elbe-Seitenkanal durch die WSV erfolgt vorrangig mit dem Ziel der Gewährleistung von Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs. Die Einhaltung dieses Zieles bei gleichzeitiger Sicherstellung weiterer Nutzungen durch Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe erfordert eine optimale, ausgeglichene Nutzungsbelastung des Systems, die auch durch (erhöhte) landwirtschaftliche Entnahme nicht gefährdet werden darf. Diese Rahmenbedingungen wurden in den Szenarienrechnungen angesetzt.

In den Szenarien wurde untersucht, bis zu welcher Höhe zusätzliche, über die derzeitige Genehmigungslage hinausgehende Wasserentnahmen für die landwirtschaftliche Feldberegnung bei gleichzeitiger Berücksichtigung eines hohen Schifffahrtsaufkommens und weiterer hoher Nutzungsverluste durch die bestehenden Pumpwerke kompensiert werden könnten. Bezüglich der Schleusungszahlen und der Wasserentnahmen des größten gewerblichen Einzelnutzers (Kraftwerk Mehrum) wurde jeweils die höchste im Untersuchungszeitraum (11/2000 bis 10/2013) beobachtete Nutzungsbelastung angesetzt. Bezüglich der festgelegten Pumpkapazitäten galt auch für die hier betrachteten Szenarien der (n-1)-Fall.

Ausgehend vom Status Quo der Genehmigungslage für die Beregnungswasserentnahmen wurden die landwirtschaftlichen Entnahmen in den Szenarien schrittweise erhöht. Insgesamt wurden so 7 Berechnungsszenarien mit unterschiedlichen landwirtschaftlichen Entnahmemengen definiert. In Abb. 5 sind für alle Szenarien die Entnahmemengen jeweils für die betroffenen Haltungen des ESK und MLK sowie als Summe dargestellt.



**Abb. 5:** Darstellung der in den sieben Szenarien jeweils angesetzten landwirtschaftlichen Entnahmemengen (graue Balken) als Summe und anteilig für die mittlere Haltung (MH; blau) und Scheitelhaltung (SH; rot) des ESK sowie der Scheitelhaltung des Mittellandkanals (grün).

Die Simulationsrechnungen erfolgten ganzjährig im Tageszeitschritt für den Zeitraum 11/2000 bis 10/2013. Der Fokus der Auswertung lag jedoch auf der für die landwirtschaftliche Entnahme relevanten Beregnungsperiode, die im vorliegenden Fall auf den Zeitraum vom 01.04. bis 30.09. eines jeden Jahres festgelegt wurde.

Das modellinterne Bewirtschaftungsziel der Szenarienrechnungen ist der Ausgleich der durch die Wassernutzungen (Entnahmen, Schleusungen) verursachten Haltungsverluste unter Berücksichtigung der vorgegebenen Randbedingungen. Sobald die Verluste nicht vollständig ausgeglichen werden können, sinkt der Wasserstand in der betroffenen Haltung. Die Auswertung der Simulationsrechnungen fokussiert somit auch hier auf den simulierten Wasserstand als Indikator für die Belastbarkeit des wasserwirtschaftlichen Systems hinsichtlich erhöhter Beregnungswasserentnahmen.

Die Ergebnisse lassen folgende Aussagen zu:

- (1) Für den Ausgangszustand (Var 1) mit einer derzeit geltenden Entnahmeobergrenze von insgesamt 5,00 m³/s im ESK ergeben sich an keinem der betrachteten Tage Defizite in einer der Haltungen. Die Haltungsverluste können stets vollständig durch die Pumpwerke kompensiert werden.
- (2) Eine Erhöhung der landwirtschaftlichen Entnahmemenge auf insgesamt 5,71 m³/s bis 7,25 m³/s (Var 2 bis Var 5) führt in den Scheitelhaltungen (SH) des MLK bzw. ESK zu einem Gesamtverlust, der an einzelnen Tagen nicht mehr vollständig ausgeglichen werden kann. Es kommt zu Wasserdefiziten, die zu einem Einbruch der Wasserstände in der Scheitelhaltung führen. Der untere Betriebswasserstand BWU wird jedoch nicht unterschritten. In der mittleren Haltung des ESK treten keine Defizite auf.

- (3) Eine Erhöhung der Gesamtentnahmemenge auf insgesamt 7,79 m<sup>3</sup>/s (Var 6) bzw. 8,33 m<sup>3</sup>/s (Var 7) führt in den Scheitelhaltungen zu Einbrüchen der Wasserstände in den Berechnungsperioden aller 13 untersuchten Jahre. Insgesamt sind bei Var 6 82 Tage bzw. 308 Tage bei Var 7 betroffen, was einem Anteil von 3,4 % bzw. 12,9 % der untersuchten Tage entspricht (Tabelle 2). In beiden Szenarien unterschreiten die simulierten Wasserstände der Scheitelhaltung erstmals auch den unteren Betriebswasserstand BWU. In der mittleren Haltung treten auch in diesen beiden Szenarien keine Defizite auf.

**Tabelle 2**

Ergebnisse der untersuchten Szenarien mit schrittweise erhöhten landwirtschaftlichen Entnahmemengen, dargestellt anhand der Tage mit Wasserdefiziten in der Wasserversorgung der Scheitelhaltung ESK/MLK.

Szenario	betroffene Jahre von insgesamt 13	betroffene Tage von insgesamt 2379 in 13 Berechnungsperioden		Unterschreitung BWU in SH ESK/MLK
	[Anzahl]	[Anzahl]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]
Var 1	0	0	0,0	Nein
Var 2	1	2	0,1	Nein
Var 3	1	4	0,2	Nein
Var 4	4	9	0,4	Nein
Var 5	6	22	0,9	Nein
Var 6	13	82	3,4	Ja
Var 7	13	308	12,9	Ja

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei vollständiger Ausnutzung der derzeit geltenden Entnahmeobergrenze für die Feldberegnung aus mittlerer Haltung und Scheitelhaltung des ESK der Einsatz von n-1 Pumpen je Standort ausreichen würde, um die Haltungsverluste an allen betrachteten Tagen auszugleichen. Eine Erhöhung der Beregnungswasserentnahme auf insgesamt bis zu 7,25 m<sup>3</sup>/s würde zwar zu temporären Defiziten in der Scheitelhaltung führen, der untere Betriebswasserstand wäre jedoch zu keiner Zeit unterschritten. Dies wäre erst bei einer weiteren Steigerung der Entnahmen (z. B. auf 7,79 m<sup>3</sup>/s oder 8,33 m<sup>3</sup>/s) der Fall.

## 4 Fazit

Die im Rahmen mehrerer Projekte an der BfG durchgeführten Untersuchungen lassen zusammenfassend den Schluss zu, dass für die Beantwortung unterschiedlichster wasserwirtschaftlicher Fragestellungen Szenarien notwendig sind, um die Auswirkungen möglicher anstehender Systemänderungen abschätzen oder die Praxisanwendbarkeit geplanter Systemänderungen vorab theoretisch prüfen zu können.

Zu beachten ist dabei aber, dass die Aussagefähigkeit von Szenarien immer gebunden ist an die Genauigkeit der in den Berechnungen verwendeten Daten, der Möglichkeiten des eingesetzten Modellwerkzeuges und der Formulierung der Randbedingungen.

## Literatur

- CASH, D. W., W. ADGER, F. BERKES, P. GARDEN, L. LEBEL, P. OLSSON, L. PRITCHARD, O. YOUNG (2006): Scale and cross-scale dynamics: governance and information in a multilevel world. *Ecology and Society* 11(2): 8.
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D., J. HOHENRAINER, K. RICHTER, R. OPPERMAN, S. KRAUSE (2011): BEWASYS Rhein-Oder – Tageswertmodell zur Simulation der Wasserbewirtschaftung der Bundeswasserstraßen zwischen Rhein und Oder. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1730.
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D., M. CARAMBIA, J. HOHENRAINER, E. NILSON, K. RICHTER (2012): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels und veränderter Ansprüche der Nutzer auf die Bewirtschaftung des Westdeutschen Kanalsystems. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Überregionale Wasserbewirtschaftung – Entwicklung und Einsatz eines Informationssystems und verschiedener Modelle. Kolloquium am 12./13. Oktober 2012 in Hannover. – Veranstaltungen 2/2012, S. 42-53.
- HOHENRAINER, J. (2017): Wasserbewirtschaftungsdaten – Grundlage für Systemverständnis und Modellierung. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 32-43
- HOHENRAINER, J., A.-D. EBNER VON ESCHENBACH (2016): Untersuchungen zu den Auswirkungen zusätzlicher Wasserentnahmen für die Feldberegnung aus dem Elbe-Seitenkanal und der Scheitelhaltung des Mittellandkanals - Vollständige Fassung, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1898.
- ECKOLD, M. (1998): Flüsse und Kanäle – Die Geschichte der deutschen Wasserstraßen. Autoren: Braun, H.-G.; Rohde, H.; Rümelin, B.; Strähler, W.; Uhlemann, H.-J.; DSV Verlag Busse Seewald.
- GABLER (2013): Gabler Wirtschaftslexikon von Springer Fachmedien Wiesbaden, Springer Gabler; Auflage: 18 (23. September 2013).
- WSA Duisburg-Meiderich (2014): Auftrag „Untersuchungen zu den Auswirkungen des Neubaus der Schleusenkammer Nord in Wanne-Eickel auf die Auslastung der Pumpwerksketten“. BfG/M2/408.12/44727, 22.12.2014.
- WSA Duisburg-Meiderich (2016): Erläuterungen zur Bedeutung des Westdeutschen Kanalsystems. Zuarbeit des WSA Duisburg-Meiderich, unveröffentlicht.

### Kontakt:

#### Katharina Richter

Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Am Mainzer Tor 1  
56068 Koblenz  
Tel.: 0261/ 1306 5181  
E-Mail: richter@bafg.de

# Öffentliche Wasserversorgung Berlin – Wasserversorgungskonzept 2040

Jens Burgschweiger

## 1 Einleitung

Die Berliner Wasserbetriebe sind das größte Unternehmen für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Deutschland. Im Jahr 2013 wurde mit neun Wasserwerken, ca. 700 Brunnen und einem Rohrnetz von 7.900 km Länge ein Wasserverkauf von 193 Mio. m<sup>3</sup> gewährleistet. In sechs Klärwerken wurden 240 Mio. m<sup>3</sup> Abwasser behandelt. Für den Abwassertransport dienen 9.700 km Kanalnetz, 157 Pumpwerke und 1.170 km Druckrohrleitungen. Mit 4.490 Beschäftigten wurde ein Umsatz von 1,1 Mrd. € erzielt.

Es soll hier gezeigt werden, wie sich die Entwicklung verschiedener Randbedingungen für die Wasserversorgung Berlins – dargestellt in Form von Szenarien – in der Nutzung verschiedener Oberflächengewässerabschnitte im Spree-Havel-System von Berlin bemerkbar macht. Die Nutzung von Spree und Havel für die Wasserversorgung Berlins kann zu Konflikten mit anderen Oberflächengewässernutzungen, wie z. B. dem Bergbau im Lausitzer Revier am Oberlauf der Spree oder der Schifffahrt im Bereich der Berliner Oberhavel, führen.

Mit der Erstellung des Wasserversorgungskonzeptes (WVK 2040) sollten die konzeptionellen Grundlagen für die Wasserversorgung in Berlin zusammengestellt bzw. neu erarbeitet werden. Die zwischen den Berliner Wasserbetrieben und der Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz abgestimmte Unterlage wurde als Grundlage für die Standortentscheidungen der noch bestehenden, aber nicht mehr genutzten Wassergewinnungsgebiete benötigt. Für die weiter genutzten Standorte sollten die erforderlichen Antragsmengen für die Bewilligungsverfahren der Wasserwerke erarbeitet werden.

## 2 Grundsätze der Wasserversorgung Berlins

Zu Beginn der Erstellung des Wasserversorgungskonzeptes wurden die Grundsätze der Wasserversorgung Berlins aufgestellt. Diese lauten:

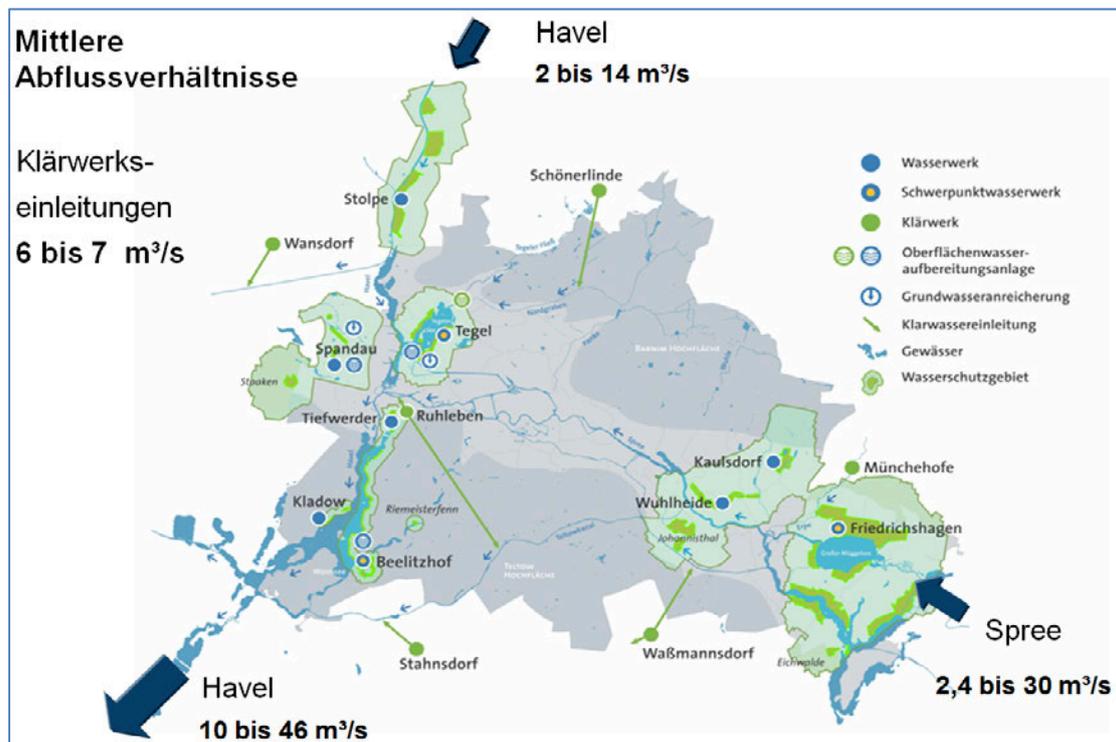
- > Gewährleistung einer hohen Versorgungssicherheit und hohen Wasserqualität durch die Nutzung regionaler Ressourcen
- > schonende Bewirtschaftung des Grundwassers und behutsamer Umgang mit der Natur
- > naturnahe Aufbereitung mit einfachen technischen Mitteln
- > wirtschaftlicher Betrieb der Wasserversorgungsanlagen unter anderem mit dem Ziel sozialverträglicher Wassertarife

- > Nutzung von Synergieeffekten zwischen Trinkwassergewinnung und Sicherung siedlungsverträglicher Grundwasserstände im Sinne einer nachhaltigen Wasserwirtschaft

### 3 Das Wasserversorgungssystem Berlins

Bis auf das Wasserwerk Stolpe im Norden, vor den Toren Berlins, befinden sich alle Wasserwerke innerhalb der Berliner Stadtgrenze. Die Versorgung findet ausschließlich mit naturnah aufbereitetem Grundwasser statt. Bei der naturnahen Aufbereitung folgt einer Belüftung die Filtration mit Sand, Kies bzw. Anthrazit. Die Aufbereitung dient vorrangig der Entfernung von Eisen und Mangan. Das geförderte Grundwasser speist sich aus natürlichen Niederschlägen, künstlich angereichertem Grundwasser und Uferfiltrat.

Die Region Berlin-Brandenburg ist „gewässerreich, aber wasserarm“. Das bedeutet, die Abflüsse von Spree und Havel sind gering im Verhältnis zu den Wasserentnahmen in Form von Uferfiltrat und Grundwasseranreicherung durch die Wasserwerke und zu den Wassereinleitungen durch die Klärwerke. Diese Situation wird veranschaulicht in Abb. 1.



**Abb. 1:** Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungssystem für Berlin (Quelle: Berliner Wasserbetriebe)

### 4 Prognose des Wasserbedarfs

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Wasserversorgungskonzeptes lagen Studien der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung für den Zeitraum 2002 bis 2020 (SenStadt 2004) und des Bundesinstitutes für Bevölkerungsforschung für den Zeitraum bis 2040 (BOHMSDORF & BABEL 2005) vor (Abb. 2). Mit Hilfe der Prognose für die Bevölkerungsentwicklung und der

Abschätzung des zukünftigen spezifischen Trinkwasserbedarfs wurde der zukünftige Wasserbedarf für die Haushalte berechnet. Zusammen mit den Ansätzen für den industriellen und sonstigen Bedarf sowie für die Spülwasser- und Rohrnetzverluste konnte der Rohwasserbedarf der Wasserwerke abgeschätzt werden (Abb. 3). Die Abschätzung erfolgte jeweils mit Parametersätzen für die drei Szenarien Basis, Steigerung und Schrumpfung.

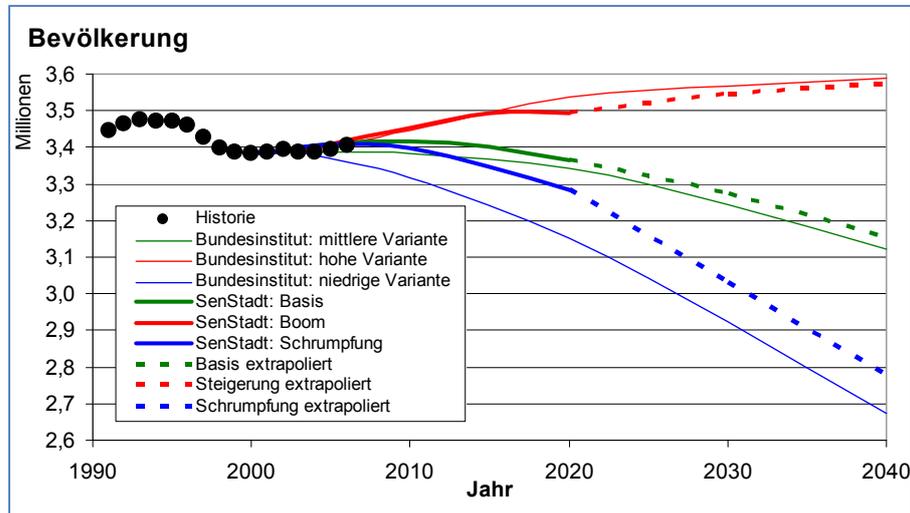


Abb. 2: Prognosen der Bevölkerungsentwicklung für Berlin (WVK 2040)

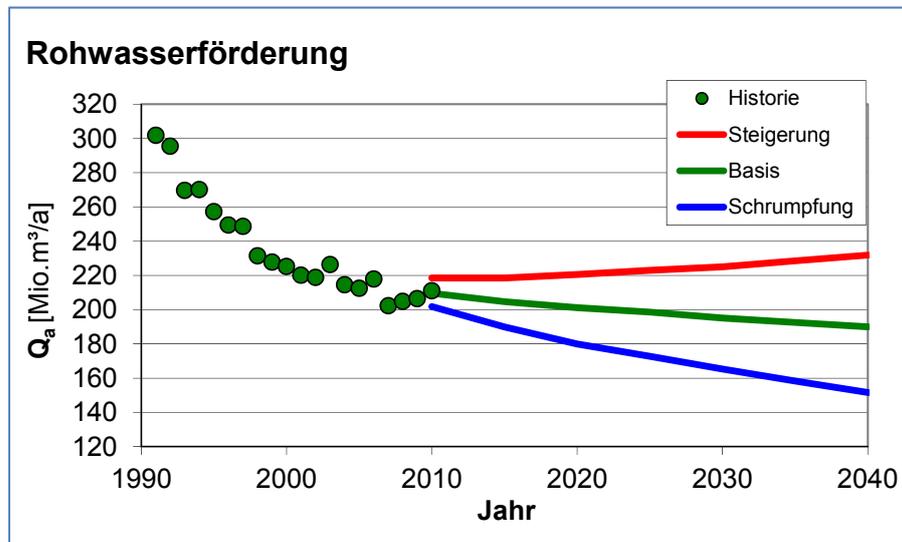


Abb. 3: Prognose des Trinkwasserbedarfs für Berlin aus dem Jahr 2008 (WVK 2040)

## 5 Deckung des Wasserbedarfs

Wesentliche Aufgabe des WVK 2040 war es nachzuweisen, wie unter den unsicheren Randbedingungen bis zum Jahr 2040 die Wasserversorgung für Berlin und für das von den Berliner Wasserbetrieben versorgte Umland sichergestellt werden kann. Zu diesem Zweck wurden Bilanzen für die Deckung des prognostizierten Trinkwasserbedarfs mit den zur Verfügung stehenden Wasserwerken bzw. außer Betrieb befindlichen Wasserwerksstandorten erstellt.

Dabei wurden sowohl die mit höherer Wahrscheinlichkeit erwarteten Randbedingungen als auch besondere Szenarien, in denen sich die Randbedingungen im Hinblick auf bestimmte Parameter besonders ändern, berücksichtigt.

## 5.1 Erwartete Randbedingungen

In Tabelle 1 werden die Wasserwerksförderungen zur Deckung des prognostizierten Bedarfs für die Prognosevarianten Schrumpfung, Basis und Steigerung dokumentiert. Bedeutsam für die Bilanzierung der Oberflächengewässerabschnitte im staugeregelten Berliner Gewässersystem ist, dass die einzelnen Wasserwerke über Uferfiltration oder künstliche Grundwasseranreicherung Wasser aus unterschiedlichen Gewässerabschnitten gewinnen.

Aus der Oberhavel entnehmen die Wasserwerke Stolpe, Spandau und Tegel, aus der Spree und dem Teltowkanal die Wasserwerke Friedrichshagen, Wuhlheide, Johannisthal und Jungfernheide. Während die Wasserwerke Tiefwerder, Beelitzhof und Kladow relativ große Anteile ihres Dargebots durch Uferfiltrat aus der Unterhavel fördern, schöpfen die relativ kleinen Werke Kaulsdorf, Buch und Altglienicke ihr Dargebot nahezu ausschließlich aus natürlicher Grundwasserneubildung.

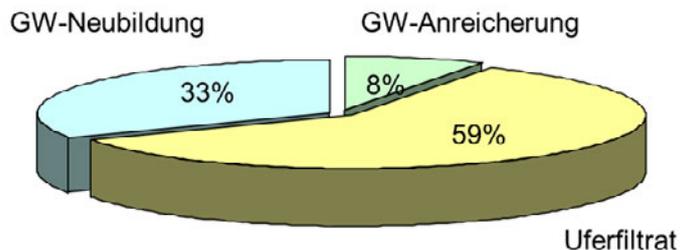
**Tabelle 1**

Deckung des prognostizierten Wasserbedarfs durch die Wasserwerke der Berliner Wasserbetriebe für die Prognosevarianten Schrumpfung, Basis und Steigerung (WVK 2040)

Wasserwerke	GW Förderung Variante Schrumpfung [Mo. m <sup>3</sup> /a]			GW Förderung Variante Basis [Mo. m <sup>3</sup> /a]			GW Förderung Variante Steigerung [Mo. m <sup>3</sup> /a]		
	2010	2020	2040	2010	2020	2040	2010	2020	2040
Stolpe	19	18	12	20	19	16	21	21	23
Spandau	27	22	18	27	25	25	30	30	31
Tegel	40	38	25	40	40	38	44	44	49
Tiefwerder	12	10	9	12	12	10	12	12	12
Beelitzhof inkl. Riemelsterfenn	28	26	20	30	28	28	30	30	30
Kladow	5	4	4	5	5	4	5	5	5
Friedrichshagen	44	34	27	49	44	37	51	52	56
Johannisthal / Altglienicke	11	11	11	11	11	11	11	11	12
Kaulsdorf	6	6	6	7	6	6	7	7	7
Wuhlheide	9	9	9	9	9	9	9	9	10
Jungfernheide	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Buch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe	201	178	141	210	199	184	220	221	235
Summe Anteil Berlin	201	178	141	210	199	184	220	221	235

## 5.2 Szenario Klimawandel

Im Szenario Klimawandel wurde untersucht, wie sich der von BOHMSDORF & BABEL (2005) prognostizierte Rückgang der Grundwasserneubildung auswirkt und wie die Wasserversorgung dann realisiert werden kann. In diesem Fall würde sich der auf ca. ein Drittel geschätzte Dargebotsanteil der natürlichen Grundwasserneubildung (Abb. 4) reduzieren.



**Abb. 4:** Abschätzung der Herkunft des von den Berliner Wasserbetrieben geförderten Grundwassers (Quelle: Berliner Wasserbetriebe)

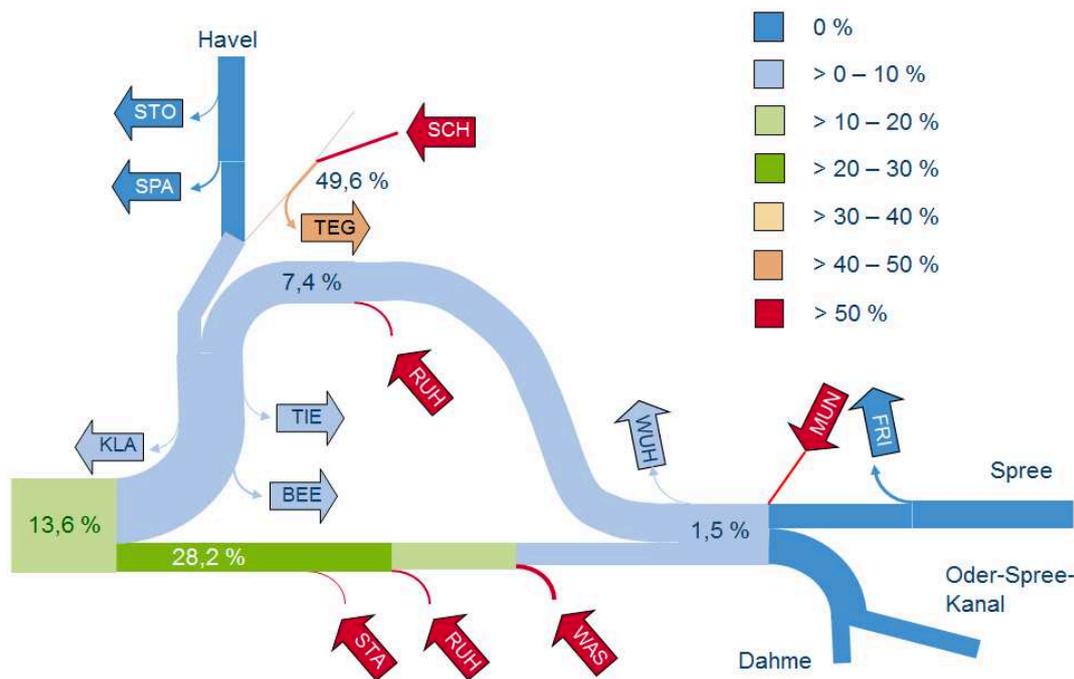
Das Szenario Klimawandel wurde für 2040 definiert durch einen steigenden Wasserbedarf auf 235 Mio. m<sup>3</sup>/a bei einer nach BOHMSDORF & BABEL (2005) um 40 % zurückgehenden Grundwasserneubildung. Von diesem Szenario besonders betroffen wären Wasserwerke mit hohem Anteil an natürlicher Grundwasserneubildung am geförderten Grundwasser. Dazu gehört das Wasserwerk Kaulsdorf, das nahezu ausschließlich natürlich gebildetes Grundwasser fördert.

Der Rückgang der Grundwasserneubildung müsste an anderer Stelle durch Uferfiltrat oder künstliche Grundwasserneubildung kompensiert werden. Daraus resultieren steigende Qualitäts- und Quantitätsanforderungen an das Oberflächenwasser. Besonders wichtig für das Funktionieren der Schifffahrt im stauregulierten Spree-Havel-System von Berlin wird die Ausbalanzierung von Förderung aus Uferfiltrat und Grundwasseranreicherung mit der Wiedereinleitung des gereinigten Grundwassers in die jeweilige Staustufe.

### 5.3 Szenario Spurenstoffe

Die Wasserwerke der Berliner Wasserbetriebe entnehmen dem Berliner Oberflächen-Gewässersystem über Uferfiltration und künstliche Grundwasseranreicherung Wasser. Gleichzeitig wird diesem Gewässersystem gereinigtes Abwasser über die Klärwerke der Berliner Wasserbetriebe zugefügt. Insgesamt ist die Wasserbilanz damit mehr als ausgeglichen. Wenn man berücksichtigt, dass ca. ein Drittel des mit den Brunnen der Wasserwerke geförderten Wassers aus natürlicher Grundwasserneubildung gespeist wird, stellt man fest, dass den Oberflächenwasserkörpern über die Klärwerke sogar mehr Wasser zugefügt als von den Wasserwerken entnommen wird. Dieser Bilanzüberschuss ist für die Gewährleistung der Stauhaltungen sehr willkommen. Deutlich wird aber auch die besondere Bedeutung der Reinigungsleistung der Klärwerke für die Qualität der Oberflächengewässer, wenn man den Anteil des gereinigten Abwassers in den einzelnen Oberflächengewässerabschnitten abschätzt (Abb. 5).

Im Szenario Spurenstoffe wurde untersucht, wie die Förderung von Wasserwerksstandorten, die besonders mit Spurenstoffen beeinflusst sind, zu weniger beeinflussten Standorten umverteilt werden kann. Konkret käme eine Umverteilung vom Wasserwerk Tegel zum Wasserwerk Friedrichshagen in Betracht. Damit verbunden wäre eine Umverteilung der Uferfiltratentnahme von der Oberhavel zur Spree.



**Abb. 5:** Abschätzung des Anteils an gereinigtem Abwasser am Oberflächenwasserabfluss (Quelle: Berliner Wasserbetriebe)

## 5.4 Szenario Sulfatbelastung der Spree

In diesem Szenario wurde untersucht, wie sich die mit dem Braunkohlentagebau im Lausitzer Revier verbundene Sulfatbelastung der Spree auf die Wasserwerksförderung auswirken könnte. Am stärksten betroffen wäre das Wasserwerk Friedrichshagen mit einem hohen Uferfiltratanteil aus der Spree. Bei einem Szenario, in dem durch die Sulfatbelastung der Spree der Trinkwassergrenzwert von 250 mg (Sulfat)/l nicht mehr eingehalten werden kann, müsste die Förderung auf die Wasserwerke der Oberhavel umverteilt werden. Eine solche Umverteilung wäre jedoch nur mit hohen Investitionen in das Rohrnetz möglich, um das Trinkwasser von dort zu den Kunden fördern zu können.

## 6 Zusammenfassung

Im Wasserversorgungskonzept 2040 wurde untersucht, wie die Wasserversorgung Berlins unter Berücksichtigung sich ändernder Randbedingungen sichergestellt werden kann. Die Randbedingungen variierten dabei hinsichtlich der Bevölkerungsentwicklung und des Wasserbedarfs sowie hinsichtlich der Beeinflussung des Dargebots durch den Klimawandel, durch den Gebrauch von Arzneimitteln (Spurenstoffe) und durch die Sulfatbelastung aus dem Braunkohlentagebau. Bei veränderten Randbedingungen kann eine Umverteilung von einem Wasserwerksstandort auf einen anderen notwendig werden. Eine solche Umverteilung ist in der Regel mit einer Veränderung der Entnahme aus den Oberflächenwasserkörpern bzw. Staustufen verbunden. In der gewässerreichen aber wasserarmen Region Berlin-Brandenburg können daraus Konflikte zwischen den Zielen der Wasserversorgung und denen der Schifffahrt entstehen, die dann gemeinsam gelöst werden müssen.

## Literatur

BOHMSDORF & BABEL (2005): Deutschlands Millionenstädte im demografischen Wandel. Fakten und Perspektiven bis 2040, Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung, Wiesbaden

SenStadt (2004): Bevölkerungsentwicklung in der Metropolenregion Berlin 2002 – 2020, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin

WVK 2040 (2008): Möller, Burgschweiger (Hrsg.), Wasserversorgungskonzept für Berlin und für das von den Berliner Wasserbetrieben versorgte Umland – Entwicklung bis 2040

### **Kontakt:**

**Dr. Jens Burgschweiger**

Berliner Wasserbetriebe

Neue Jüdenstraße 1

10179 Berlin

Tel.: 030/ 8644 6314

E-Mail: [jens.burgschweiger@bwb.de](mailto:jens.burgschweiger@bwb.de)

# Management und Nutzung von Wasserressourcen für die Landwirtschaft

Jörg Steidl

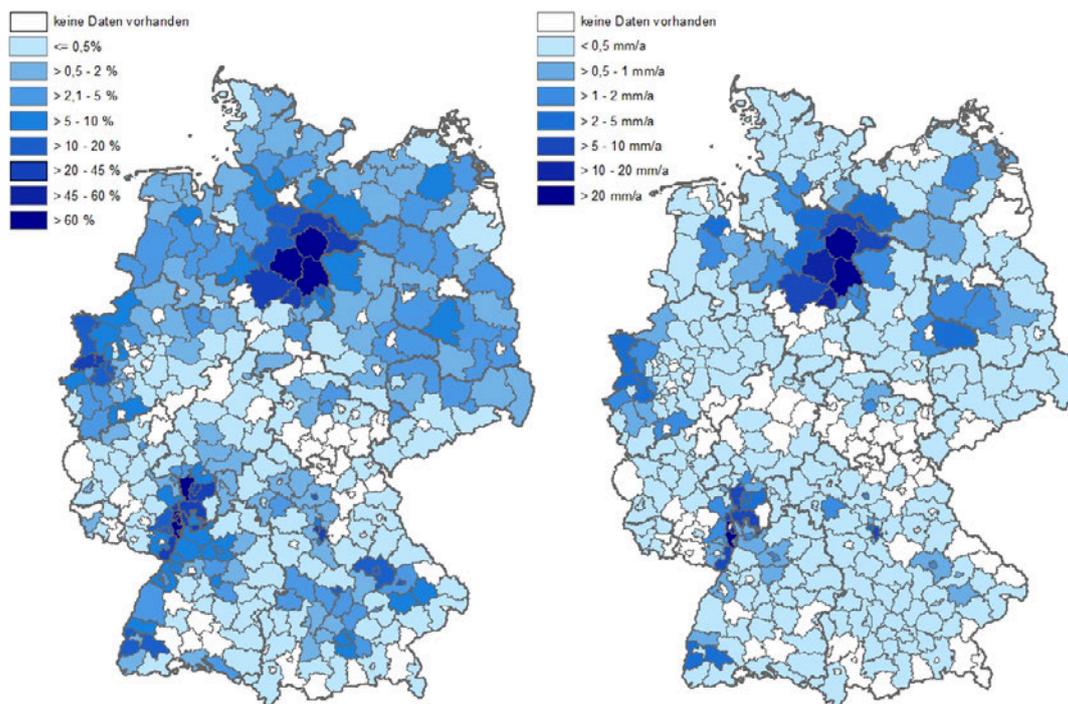
## 1 Einleitung

Während der Vegetationsperiode erreicht die mittlere Niederschlagshöhe der Reihe 1981-2010 für große Teile Sachsen-Anhalts, Brandenburgs und Mecklenburgs, aber auch in Teilen Thüringens, Sachsens und der Pfalz höchstens 400 mm. Demgegenüber liegt die mittlere potenzielle Verdunstung deutlich darüber, so dass im Mittel ein klimatisches Wasserbilanzdefizit besteht. Von einem ähnlichen Defizit sind weitere Regionen wie die Lüneburger Heide und Teile des Oberrheinischen Tieflandes sowie Frankens betroffen. Aus dem Bodenvasservorrat gering wasserspeicherfähiger Böden kann dieses Defizit oft nicht gedeckt werden. Dort, wo in den genannten Regionen solche Böden vorhanden sind, kann häufig mit Trockenstresssituationen gerechnet werden, die Ertragseinbußen, aber auch Qualitätsverluste, für die angebauten Kulturen hervorrufen können. Bei hohen Anforderungen an die Ertrags- und Qualitätssicherheit aus der Vermarktung der Ernteprodukte können daraus schließlich auch wirtschaftliche Einbußen bzw. Nachteile für die betroffenen landwirtschaftlichen Betriebe resultieren (STEIDL et al. 2015a). Die Landwirtschaft reagiert auf solche Situationen mit Bewässerung, so dass vielerorts dieser landwirtschaftliche Zusatzwasserbedarf in gebietlichen Wasserhaushaltsbetrachtungen zu berücksichtigen ist. Zukunftsorientierte modellgestützte Wasserhaushaltsuntersuchungen erfordern die Entwicklung von Szenarien, die neben dem aktuellen Zusatzwasserbedarf für die Bewässerung auch dessen Entwicklung infolge von Veränderungen des Klimas, aber auch wirtschaftlicher Faktoren, berücksichtigen sollten.

## 2 Nutzung von Wasserressourcen

Etwa 6 % der landwirtschaftlichen Betriebe Deutschlands haben die Möglichkeit, ihre Flächen oder Teilflächen zu bewässern. Das betrifft insgesamt 639.030 ha, also 3,8 % der gesamten landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland (Abb. 1, links) (Statistische Landesämter 2011/2012). Besonders in den Obst- und Gemüseanbaugebieten entlang des Rheins und in denen Bayerns, im Regierungsbezirk Düsseldorf und auch im trockenen, aber intensiv bewirtschafteten Osten Niedersachsens ist dieser Anteil überdurchschnittlich hoch. So bestehen z. B. in den Landkreisen Uelzen und Celle für mehr als 82 % bzw. 68 % der landwirtschaftlichen Flächen Möglichkeiten zur Bewässerung. Die letzte Landwirtschaftszählung ergab für das Jahr 2009 mindestens 372.749 ha landwirtschaftliche Flächen, die tatsächlich bewässert wurden. Das entspricht etwa 2,2 % der gesamten landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland.

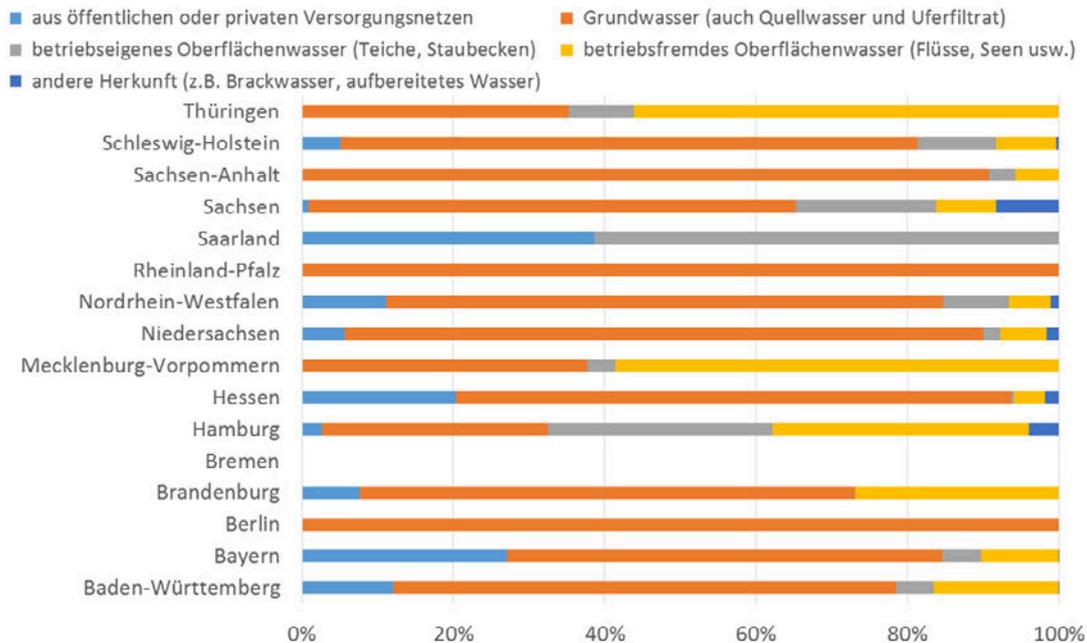
Einen Überblick über die Wasserressourcennutzung gibt die auf die Landkreisfläche bezogene Wassermenge, die für die Bewässerung eingesetzt worden ist (Abb. 1, rechts). Überdurchschnittlich hoch war die Wasserressourcennutzung in den Obst- und Gemüseanbaugebieten am Rhein und in Bayern, aber auch im Westen Nordrhein-Westfalens, in großen Teilen Niedersachsens sowie in Gebieten Mecklenburgs, Brandenburgs und Sachsen-Anhalts. Am intensivsten wurden die Wasserressourcen mit bis zu 44 mm in den Obst- und Gemüseanbaugebieten entlang des Rheins und mit bis zu 30 mm im Osten Niedersachsens beansprucht. Bei einem verfügbaren Wasserdargebot von 150 mm/a wären das immerhin zwischen 20 und 30 %.



**Abb. 1:** Anteil der landwirtschaftlichen Flächen mit der Möglichkeit zur Bewässerung an der gesamten landwirtschaftlichen Fläche (links) sowie die für die Bewässerung eingesetzte Wassermenge auf die Landkreisfläche bezogen (rechts) im Jahr 2009 (Datenquelle: Statistische Landesämter 2011/2012)

In den meisten Bundesländern wurde im Jahr 2009 zum größten Teil Grundwasser für die Bewässerung genutzt (Abb. 2). Deutschlandweit ist das ein Anteil von 78 % an der insgesamt für die landwirtschaftliche Bewässerung gewonnenen Wassermenge. Etwa 14 % des Bewässerungswassers wurde Oberflächengewässern (Flüsse, Seen, Teiche, Staubecken usw.) entnommen. Ein Prozent des Bewässerungswassers stammt aus Brackwasser oder aufbereitetem Wasser. Die natürliche Herkunft des verbleibenden Anteils bleibt in der Landwirtschaftszählung unklar.

Großflächige und ergiebige Grundwasservorkommen, die für die Wassergewinnung zur Bewässerung nutzbar sind, befinden sich vor allem im Norddeutschen Tiefland und im Alpenvorland. Aber auch der Oberrheingraben sowie die Niederrheinische Bucht und das Niederrheinische Tiefland zählen zu den Gebieten mit sehr ergiebigen Grundwasservorkommen. Deutlich kleinräumiger und weniger ergiebig sind die Grundwasservorkommen in den Mittelgebirgsregionen. In vielen Mittelgebirgen ist das Grundwasser in sandig-kiesigen Talfüllungen oder Schuttfächern am Gebirgsfuß bestenfalls lokal nutzbar (BMU 2003).



**Abb. 2:** Verbrauchte Wassermenge für die Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben anteilig nach Wasserherkunft im Jahr 2009 (Datenquelle: Statistische Landesämter 2011/2012)

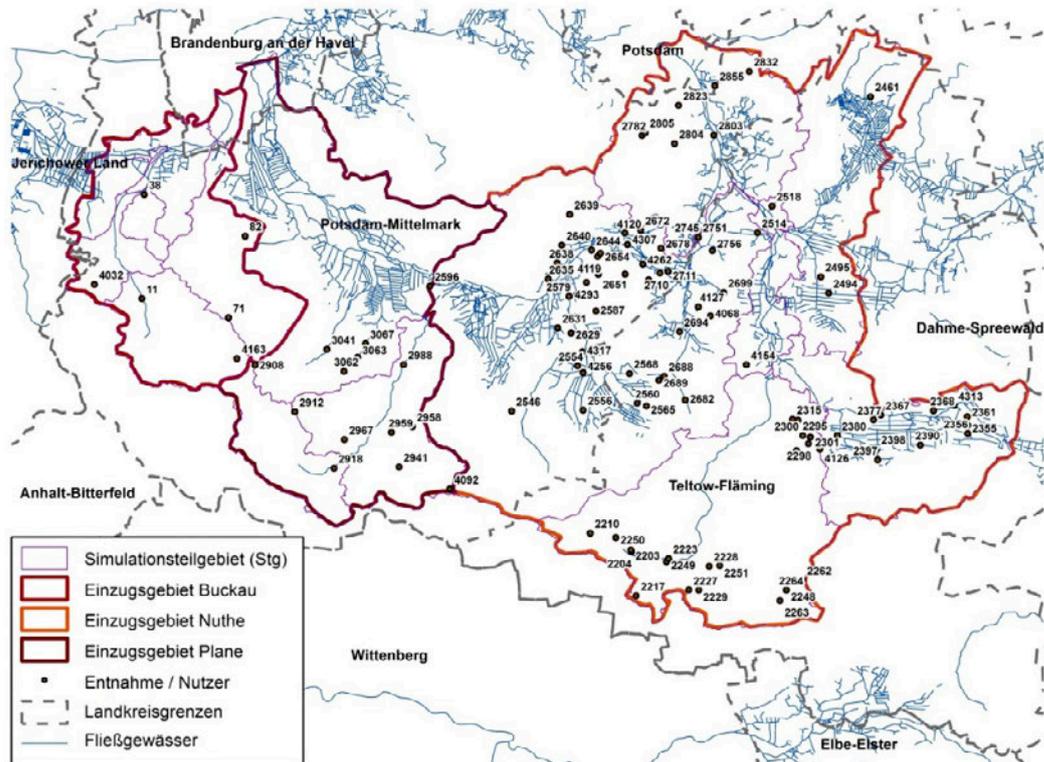
Die Wiederauffüllung der Grundwasserressourcen durch die Grundwasserneubildung ist infolge der meteorologischen und auch orographischen Situation sowie der hydrologischen Bodeneigenschaften wie Wasserspeichervermögen und Bedeckung ebenso regional ungleich verteilt wie der Niederschlag. So weist BMU (2003) für die großflächigen und ergiebigen Grundwasservorkommen im Nordostdeutschen Tiefland, insbesondere in Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Vorpommern, aber auch in Thüringen, eine sehr geringe Grundwasserneubildung aus. Besonders in Brandenburg und Vorpommern ist dafür die hohe Verdunstung der zahlreichen Gewässer und grundwassernahen Niederungsgebiete maßgeblich verantwortlich, die insgesamt einen hohen Flächenanteil ausmachen. Aber auch im Südwesten Deutschlands ist die Grundwasserneubildung wie in Rheinland-Pfalz eher gering. Eine deutlich höhere Grundwasserneubildung wird für größere Teile Schleswig-Holsteins, Nordrhein-Westfalens sowie für das bayrische Alpenvorland ausgewiesen.

Trotzdem konnten ARLE et al. (2013) für fast alle Grundwasserkörper in Deutschland keine übermäßige Nutzung feststellen und ihnen einen guten mengenmäßigen Zustand bescheinigen. Ausnahmen waren dabei vor allem die immer noch bergbaulich beeinflussten Grundwasserkörper in Brandenburg, Sachsen und Nordrhein-Westfalen.

### 3 Management von Wasserressourcen

Das Management der Wasserressourcen beginnt mit der Bereitstellung des Wassers an dem Ort, wo es benötigt wird. Dazu sind z. B. im Einzugsgebiet der südlich von Berlin gelegenen Nuthe derzeit 119 landwirtschaftliche Grundwasserentnahmestellen in Betrieb (Abb. 3). STEIDL et al. (2015b) berechneten den Zusatzwasserbedarf der bewässerten Fruchtarten im

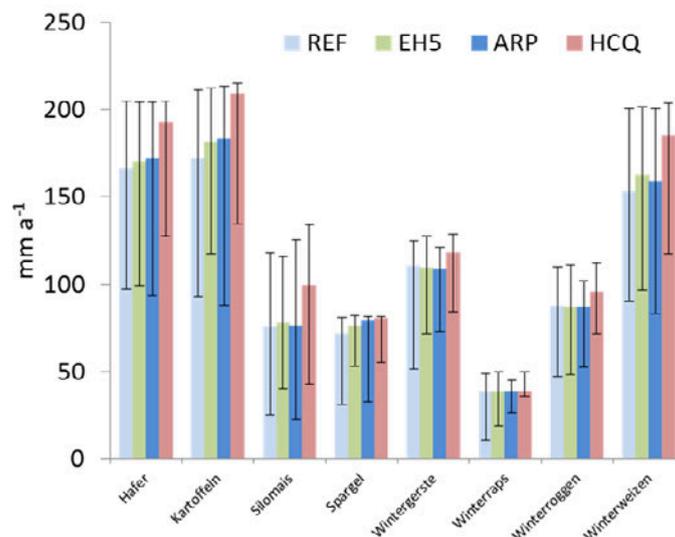
Einzugsgebiet der Nuthe für verschiedene Klimaszenarien (Abb. 4). Dieser ist für Kartoffeln, gefolgt von Hafer und Winterweizen, am höchsten und für Winterraps am niedrigsten. Es wird aber auch deutlich, dass diese Zusatzwasserbedarfe allein infolge einer innerjährlichen Umverteilung der Niederschläge auf den Winter gegenüber heute zunehmen können. Im Referenzszenario REF, das von einem unveränderlichen Klima ausgeht, werden sie meist etwas geringer als in den moderateren Klimaänderungsszenarien EH5 und ARP ausgewiesen. Sollten die Annahmen des extremen Klimaänderungsszenarios HCQ eintreffen, ist mit Ausnahme von Winterraps jedoch immer eine deutliche Zunahme des Zusatzwasserbedarfs zu erwarten.



**Abb. 3:** Lage der Wasserentnahmen für die landwirtschaftliche Bewässerung in drei Einzugsgebieten von Havelzuflüssen südwestlich Berlins (STEIDL et. al 2015a)

Möglichkeiten der Wasserüberleitung aus Gebieten mit einem ausreichenden Wasserüberschuss werden nachgefragt, wenn der Zusatzwasserbedarf aus örtlich nutzbaren Wasserressourcen nicht mehr gedeckt werden kann. Bereits bestehende großräumige Wasserüberleitungen in Deutschland dienen meist anderen primären Zielen als denen eines landwirtschaftlichen Wassermanagements (Trinkwassergewinnung, Zusatzwasserbereitstellung für die Schifffahrtsstraßen etc.). In einigen Fällen profitiert aber auch die Landwirtschaft davon. So wird Wasser aus Donau und Altmühl in das Main-Regnitz-Gebiet geleitet und dort im Knoblauchsland zum Teil für den Gemüseanbau genutzt. In die Stauhaltung des Elbe-Seitenkanals zwischen Uelzen und Lüneburg wird neben dem Zusatzwasser für die Schifffahrtsstraße auch zusätzliches Wasser für die Bewässerung der angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen übergeleitet. Diese Menge soll künftig noch erhöht werden. Die Wasserstraßenkanäle besitzen also Potenziale für die Bereitstellung von Bewässerungswasser für angrenzende landwirtschaftliche Flächen. STEIDL et al. (2015a) ermittelten landwirtschaftliche Flächen von

insgesamt ca. 359.000 ha, die zur Bewässerung durch die Entnahme von Oberflächenwasser aus Wasserstraßenkanälen allein durch ihre Lage geeignet erscheinen. Eine vollständige Realisierung entspräche etwa einer Verdopplung der im Jahr 2009 insgesamt bewässerten landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland.



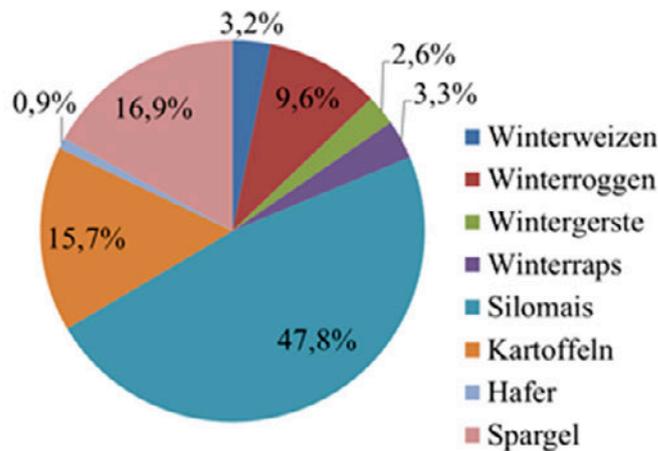
**Abb. 4:** Zusatzwasserbedarf der bewässerten Fruchtarten im Einzugsgebiet der Nuthe für verschiedene Klimaszenarien in der Periode 2018–2052 (REF – Referenzszenario mit dem heutigen, künftig unveränderten Klima; EH5, ARP, HCQ – Klimaszenarien, die die mögliche Bandbreite künftiger Klimaänderungen beschreiben)

Weitere Möglichkeiten, um den Zusatzwasserbedarf bei einem zu geringen Wasserdargebot decken zu können, wären Grundwasseranreicherungen oder die Einrichtung von Wasserspeichern. Beides setzt neben einer ausreichenden Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität aber auch die Verfügbarkeit der dafür erforderlichen Flächen voraus. Aktuell ist die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser in der Diskussion (EU-Kommission 2012). Wege und Lösungen dafür wurden im Verbundprojekt „Entwicklung eines integrierten Landmanagements durch nachhaltige Wasser- und Stoffnutzung in Nordostdeutschland“ (ELaN 2016) untersucht. Für die Aufbereitung und Speicherung von Produktionsabwässern zur landwirtschaftlichen Bewässerung wurde bereits eine Pilotlösung für eine Zuckerfabrik in Uelzen geschaffen (MARTENS 2024).

Ein weiteres Feld des Wassermanagements ist die Be- und Entwässerung der Niederungen im Norddeutschen Tiefland, die überwiegend als landwirtschaftliches Grünland genutzt werden. DIETRICH et al. (2011) sehen in den meisten der 35 großen Niederungen des Elbetieflands künftig häufigere und stärkere Unterschreitungen heutiger Ziel-Grundwasserstände. Die Ursache dafür liegt in der zunehmenden Verdunstung aus den Niederungsgebieten und dem gleichzeitig stärker begrenzten Wasserdargebot aus ihren Einzugsgebieten. Bereits heute vorhandene Probleme bei der Erhaltung des Feuchtgebietscharakters großer Teile dieser Gebiete dürften damit künftig zunehmen.

## 4 Aspekte der Entwicklung von Modellszenarien

Als Datenquellen für die Entwicklung von Modellszenarien zum landwirtschaftlichen Wassermanagement stehen zunächst die Daten der Erlaubnisse/Genehmigungen für Wasserentnahmen der zuständigen Behörden zur Lage, maximalen Wasserentnahme sowie zur Flächengröße zur Verfügung. Aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem der Europäischen Kommission (InVeKoS) lassen sich für jedes Jahr die auf den bewirtschafteten Feldblöcken angebauten Fruchtarten entnehmen. Daten zur tatsächlichen Bewässerung stehen aber nur aus Landwirtschaftszählungen zur Verfügung (Statistisches Bundesamt 2013). Diese Erhebungen werden zwar in Abständen von etwa 10 Jahren durchgeführt, liefern dann aber ein umfassendes Bild zu den tatsächlich bewässerten Flächen und Fruchtarten sowie zum Wasserverbrauch. Dabei sind die Ergebnisse aus Gründen des Datenschutzes höchstens für Landkreisflächen aggregiert uneingeschränkt zugänglich. Daher ist noch ein hohes Maß an Expertenwissen erforderlich, um möglichst realitätsnah abbilden zu können, welche Flächen mit welchen Fruchtarten in Einzugsgebieten bewässert wurden (Abb. 5).

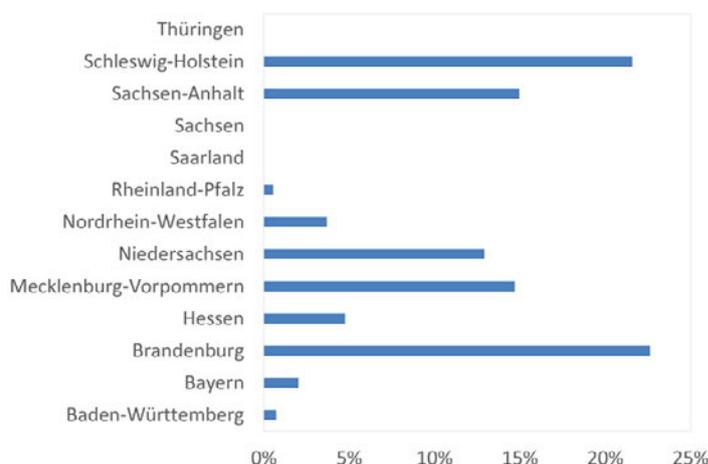


**Abb. 5:** Flächenanteil der bewässerten Fruchtarten am Beispiel des Nuthe-Einzugsgebietes (STEIDL et al. 2015b)

Zur Entwicklung künftiger landwirtschaftlicher Bewässerungsszenarien müssen neben der Klimaänderung weitere Treiber für die Bewässerung berücksichtigt werden. Da die deutsche Landwirtschaft immer stärker an den Weltmarkt gebunden werden soll, sind das z. B. die Nahrungsmittelpreise auf diesem Markt. Diese haben sich für Nahrungsmittelrohstoffe (Getreide, Ölsaaten usw.) von 2005 bis 2012 mehr als verdoppelt (Statistisches Bundesamt 2012). Steigende Preise erhöhen die Wirtschaftlichkeit der Beregnung. Flächen, deren Bewässerung bislang unwirtschaftlich war, können ab einem bestimmten Preisniveau durchaus wirtschaftlich zu bewässern sein. Durch steigende Weltmarktpreise könnte also die Beregnungsfläche in Deutschland zunehmen.

Ein Beispiel für den Einfluss ökonomischer Größen auf die Beregnungsfläche hat bereits der Anbau nachwachsender Rohstoffe geliefert. Die Anbaufläche ist von 2005 bis 2015 um 71 % gewachsen (FNR 2015). Auf 43 % dieser Flächen wurden in 2015 Rohstoffe für Biogasanlagen angebaut. Mais ist dabei der bedeutendste Rohstoff. Ist die Beregnung der Futterpflanze

Mais wirtschaftlich kaum vertretbar, sieht das als nachwachsender Rohstoff jedoch anders aus. So wurde bereits 2009 auf über 15 % der bewässerten Flächen in Norddeutschland Silomais angebaut (Abb. 6) (Statistische Landesämter 2011/2012); in Brandenburg und Schleswig-Holstein allein sogar auf mehr als 20 % der Flächen. Ob dieser Anteil nach 2009 weiter angestiegen sein wird, lässt sich frühestens aus der nächsten Landwirtschaftszählung um 2020 ermitteln.



**Abb. 6:** Anteil der Silomais/Grünmais-Flächen an den in den Bundesländern bewässerten landwirtschaftlichen Flächen in 2009

Schließlich wäre zu überprüfen, wie sich Ergebnisse der Pflanzenzüchtungsforschung hinsichtlich der Verbesserung von Trockenstresstoleranz und Steigerung der Wassereffizienz (CONDON et al. 2004) durch den Einsatz neuer landwirtschaftlichen Pflanzen auf den künftigen Zusatzwasserbedarf auswirken können.

## 5 Zusammenfassung

Aus landwirtschaftlicher Sicht ist in Deutschland gegenwärtig keine Wasserknappheit auf nationaler Ebene gegeben. Bei hoher Ausschöpfung des örtlich verfügbaren Wasserdargebotes ergeben sich aber regionale Engpässe, die im Einzelfall bereits heute durch Wasserüberleitungen entschärft werden. Solche und andere Engpässe können sich künftig verstärken oder auch häufen. In der Folge innerjährlicher Umverteilungen von Niederschlägen aus dem Sommer in den Winter, wie sie in Klimaänderungsszenarien dargestellt werden, und den damit zu erwartenden häufiger und deutlicher ausgeprägten Trockenphasen während der Vegetationsperiode, kann der Zusatzwasserbedarf landwirtschaftlicher Kulturen zunehmen. Solche Effekte könnte durch den Einsatz trockenstresstoleranterer und wassereffizienterer Pflanzen möglicherweise gemindert werden. Schließlich können steigende Weltmarktpreise für Nahrungsmittel oder andere ökonomische Faktoren, wie die Produktion nachwachsender Rohstoffe, die landwirtschaftliche Bewässerung wirtschaftlicher machen und damit den Bewässerungswasserbedarf und die Nutzung der Wasserressourcen erhöhen. All das sollte bei der Entwicklung realitätsnaher Zukunftsszenarien für wasserwirtschaftliche Modelle beachtet werden, wenn die Berücksichtigung des landwirtschaftlichen Zusatzwasserbedarfs erforderlich ist.

## Literatur

- ARLE, J., K. BLONDIK, U. CLAUSSEN, A. DUFFEK, S. GRIMM, F. HILLIGES, A. HOFFMANN, W. LEUJAK, V. MOHAUPT, S. NAUMANN, U. PIRNTKE, S. RICHTER, P. SCHILLING, C. SCHROETER-KERMANI, A. ULLRICH, J. WELLMITZ, S. WERNER, R. WOLTER (2013): Wasserwirtschaft in Deutschland - Teil 2 - Gewässergüte. In: Umweltbundesamt (Ed.), Bonn, p. 116.
- CONDON, A., R. RICHARDS, G. REBETZKE, G. FARQUHAR (2004): Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 55 (407) (2004), pp. 2447-2460
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD), 3. Lfg., Bonn/Berlin
- DIETRICH, O., D. PAVLIK, S. SCHWEIGERT, J. STEIDL (2011): Wasserhaushalt großer Feuchtgebiete. In: *Elbe-Atlas des globalen Wandels*. Weißensee Verl., Berlin, pp. 78-79
- ELaN (2016): Mit ELaN zum integrierten Wasser- und Landmanagement. Online verfügbar: <http://www.wwt-online.de/mit-elan-zum-integrierten-wasser-und-landmanagement> (letzter Zugriff: 21.09.2016)
- EU-Kommission (2012): Ein Blueprint für den Schutz der europäischen Wasserressource. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. COM(2012) 673 final, Brüssel, den 14. 11. 2012
- FNR (2015): Entwicklung der Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe. Online verfügbar: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/anbauflaeche-fur-nachwachsende-rohstoffe.html> (letzter Zugriff: 21.09.2016)
- MARTENS, J. (2024): Wasserspeichereinweihung in Borg. Online verfügbar: <http://wasser-uelzen.de/wbv10/index.php/die-mitgleidsverbaende/bewaesserungsv-uelzen/13-projekte-bwv-uelzen> (letzter Zugriff: 21.09.2016)
- Statistisches Bundesamt (2012): Nahrungsmittelpreise in Zeiten der Globalisierung. Online verfügbar: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/Preise/2012\\_06/2012\\_06Nahrungsmittelpreise.html](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/Preise/2012_06/2012_06Nahrungsmittelpreise.html) (letzter Zugriff: 21.09.2016)
- Statistisches Bundesamt (2013): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei – Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben – Agrarstrukturerhebung. Statistisches Bundesamt. 28 S.
- Statistische Landesämter (2011/2012): Statistische Berichte zur Landwirtschaftszählung 2010
- STEIDL, J., U. SCHUBERT, J. SCHULER, O. DIETRICH, P. ZANDER, P. (2015a): Wassermanagement in der Landwirtschaft: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 2813HS007 der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Projektträger Agrarforschung. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg
- STEIDL, J., U. SCHUBERT, J. SCHULER, O. DIETRICH, P. ZANDER, P. (2015b): Expansion of an existing water management model for the analysis of opportunities and impacts of agricultural irrigation under climate change conditions. *Water* 7, 11, 6351-6377

**Kontakt:**

**Dr. Jörg Steidl**

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.

Eberswalder Straße 84

15374 Müncheberg

Tel.: 033432/ 82362

E-Mail: [jsteidl@zalf.de](mailto:jsteidl@zalf.de)

# Modellierung – Die Kunst bestmöglicher Interpolation zwischen und Extrapolation von Messdaten und Szenarien

Thomas Maurer

## 1 Was bedeutet Modellbildung und warum modellieren wir?

Simulationsmodelle begegnen uns vielfach. Dank der Verfügbarkeit von Computern mit hoher Rechenleistung und Softwaresystemen mit immer größerem Nutzerkomfort ist es heute rein technisch einfacher denn je, komplexe Modellsysteme zu entwickeln, darauf basierend Modelle aufzubauen, mit diesen Simulationen durchzuführen und die Ergebnisse in eindrucksvollen bunten Diagrammen und Graphiken zu präsentieren. Für die Einschätzung der Belastbarkeit dieser Ergebnisse bleibt es allerdings unabdingbar, sich über die Hintergründe bzw. die Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen der Modellbildung und -anwendung im Klaren zu sein. Der Beitrag soll dies unterstützen.

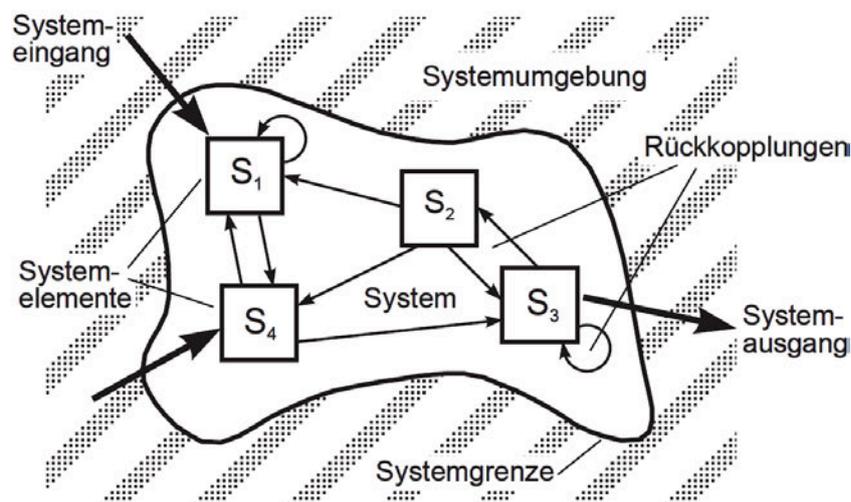
Tatsächlich modellieren wir permanent, auch im täglichen Leben, dort oft unbewusst. Wir nehmen die Umwelt wahr, beobachten, was uns interessiert, formulieren Theorien und Hypothesen zu den beobachteten Zusammenhängen und leiten Regeln ab, die uns das Beobachtete erklären und idealerweise helfen, zukünftige Entwicklungen vorherzusehen. Neue Beobachtungen nutzen wir zur Überprüfung unserer Hypothesen. Das ist ein permanenter iterativer Prozess, von Geburt an machen wir uns so ein Bild von der Welt. Dabei können zwei Ebenen unterschieden werden:

1. Feststellung von Änderungen (Detektion)
2. Ermittlung der Gründe für die Änderungen (Attributierung)

Dem Wissenschaftler geht es in erster Linie darum, Zusammenhänge in den betrachteten Systemen – hier in wasserwirtschaftlichen Systemen – zu verstehen, zu formulieren und zu quantifizieren sowie mögliche zukünftige Entwicklungen aufzuzeigen. Damit soll die für die staatliche Daseinsvorsorge verantwortliche Politik und Verwaltung möglichst vorausschauend und geschickt für die Beantwortung von Managementfragen vorbereitet werden, beispielsweise wie wir unsere Versorgungs- und Schutzbedürfnisse wahren, und dies kostengünstig oder optimal bezogen auf unsere Ziele, Werte und Möglichkeiten im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie.

## 2 Systeme und ihre Modellierung

Nach BOSSEL (1992) verwendet man den Begriff „System“, „...um damit eine Anzahl von Bestandteilen abzugrenzen, die untereinander relativ stark, mit ihrer gemeinsamen Systemumwelt aber nur schwach interagieren...“. Diese Abgrenzung ist wichtig. Die Dynamik des inneren Zustands wird unter dem Einfluss von als davon unabhängig angenommenen äußeren Einwirkungen betrachtet. Dazu wird zunächst innerhalb der festgelegten Systemgrenzen die Geometrie charakterisiert und dabei u. a. auch eine räumliche Aufteilung des betrachteten Systems gewählt, die räumliche Diskretisierung. Zentral sind sodann die Festlegung der interessierenden Zustandsvariablen (Variablen, die den Zustand charakterisieren) sowie die Formulierung ihrer Zusammenhänge untereinander und mit der Außenwelt (Prozesse). Teils müssen Prozessbeschreibungen erst noch entwickelt oder – bei Verwendung einer bestehenden Modellsystemsoftware – unter Umständen ausgewählt werden. In der Regel enthalten Prozessbeschreibungen Parameter, die festgelegt werden müssen. Die Wahl der zeitlichen Diskretisierung bestimmt schließlich, wie die Dynamik des Systems ausgehend von einem Anfangszustand (der Zustandsvariablen) unter dem Einfluss von Randbedingungen zeitlich aufgelöst simuliert werden kann.



**Abb. 1:** Systemkonzept: Innerhalb der Systemgrenze symbolisieren die Quadrate die Systemelemente, die zu jedem Zeitpunkt einen Zustand  $S$  (State) haben und in einem inneren Zusammenhang stehen, symbolisiert durch Pfeile für die Prozesse/Interaktionen. Unter dem Einfluss der Randbedingungen aus der Systemumgebung ergibt sich ein Systemeingang, der die innere Dynamik der Zustände und Prozesse bestimmt, die sich ggf. auch nach außen durch sogenannte Verhaltensgrößen am Systemausgang bemerkbar macht (aus: MAURER 1997, verändert nach BOSSEL 1992).

Grundlage des Modellaufbaus und der Simulation sind Messdaten für die Geometrie, die Prozessparameter, den Anfangszustand der Zustandsvariablen und die Randbedingungen an den Systemgrenzen. Für die Kalibrierung und Validierung des Modells sind zusätzlich Messdaten der Entwicklung der Zustandsvariablen für möglichst lange Zeiträume erforderlich. Die erreichbare Auflösung, Güte und Aussagekraft eines Modells steht und fällt mit der Verfügbarkeit dieser Daten. In der Realität liegen Daten sowohl räumlich als auch zeitlich oft weniger dicht als für einen Modellaufbau erforderlich vor. Infolgedessen müssen Annahmen getroffen werden, häufig, indem Messdaten rechnerisch interpoliert bzw. disaggregiert werden,

um Datenlücken zu überbrücken. Genau genommen ist auch das eine Form der Modellierung. In anderen Fällen werden Daten unabhängig von Messdaten gemäß angenommenen Szenarien konstruiert, z. B. um die Auswirkungen von baulichen oder betrieblichen Alternativen oder möglichen zukünftigen Entwicklungen der Randbedingungen zu untersuchen.

Sofern keine groben Fehler gemacht wurden, liefert ein derart aufgebautes Modell immer Ergebnisdaten für die Dynamik des inneren Zustandes. Die Frage ist nun, wie gut das Modell die interessierenden realen Verhältnisse abbildet. Daher kommt dem Schritt der sogenannten Modellkalibrierung, d. h. der Anpassung der Prozessparameter so, dass möglichst gute Übereinstimmung mit Messdaten des inneren Zustandes erzielt wird, große Bedeutung zu. Aber auch die Kalibrierung muss kritisch hinterfragt werden: Liefert das Modell auch belastbare Aussagen für Zeiträume, deren Daten nicht zur Kalibrierung herangezogen wurden? Erst nach dieser sogenannten Validierung – und zwar nach Möglichkeit anhand von Messdaten für die besonders interessierenden Zustände und Zielgrößen – kann von einem nach allen Regeln der Wissenschaft und Technik erstelltem Modell gesprochen werden.

Man kann Modelle als Werkzeug für eine möglichst intelligente Interpolation zwischen beobachteten Messdaten (im Raum-Zeit-Kontinuum) auffassen, als komplexe Formfunktion, in deren Parameterschätzung man ein Maximum an a-priori verfügbaren Kenntnissen der Systemstruktur einfließen lässt. Wenn dies gut gelingt, steigt das Vertrauen, dass ein Modell auch außerhalb des durch Beobachtung abgedeckten Gebiets (Regionalisierung) oder außerhalb des Beobachtungszeitraums (Zukunftsszenarien, Alternativen) belastbare Ergebnisse liefern kann. Eine Garantie gibt es auch hier nicht, denn es kann in nichtlinearen Systemen, wie dem Erdsystem bzw. Teilsystemen davon, nie ausgeschlossen werden, dass „Unknown Unknowns“ (sogenannte „Unkunks“, s. KLEMEŠ 2000) bzw. „Schwarze Schwäne“ (s. TALEB 2012) auftreten, d. h. bisher unbeobachtete Phänomene, die z. B. infolge nicht beschriebener Prozesse in Kombination mit modellierten Prozessen entstehen können oder sogar als nie dagewesene Kombination von modellierten Prozessen zwar prinzipiell abgebildet werden, aber mangels Beobachtungsdaten nicht genügend gut kalibriert sind.

Damit wird zweierlei deutlich:

1. Die Modellierung eines Systems kann immer nur eine Näherung sein bzw. ein vereinfachtes Abbild der Realität liefern, denn weder können alle Skalen aufgelöst, noch alle Kopplungen und Rückkopplungen (Prozesse) abgebildet werden. Darüber hinaus können mangels Daten auch nicht alle denkbaren (seltenen) Prozesskombinationen kalibriert werden.
2. Die Vertrauenswürdigkeit eines Modells steht und fällt mit der Verfügbarkeit von Messdaten, die zu seinem Aufbau (Abbildung der Geometrie, Parametrisierung der Prozessgleichungen) und zu seiner Überprüfung (Kalibrierung und Validierung) herangezogen werden können.

### **3 Herausforderungen bei der Modellierung**

#### **Quellen der Unsicherheit**

Wie genau können Modelle sein? Zwei Hauptgruppen von Unsicherheitsquellen können unterschieden werden:

1. Unsicherheit der verwendeten Daten: Zuerst zu nennen ist hier die generelle Messunsicherheit, die aus Messabweichungen (Messfehlern) resultiert. Eine weitere Quelle der Unsicherheit ist die lückenlose Bestimmung der Anfangsbedingungen von Zustandsvariablen, Randbedingungen und Prozessparametern. Letztere hängen sehr häufig mit den Materialeigenschaften der modellierten Systeme zusammen. Diese sind oft nur unter Laborbedingungen genau messbar. In der realen Welt (z. B. der Landschaft) sind die Materialien oft sehr heterogen verteilt (z. B. Bodenarten, Pflanzen) und ihre Eigenschaften können kaum systemweit erfasst werden (z. B. Bodendurchlässigkeit, insbesondere in tieferen Bodenschichten, Verdunstungswiderstand von Pflanzen). So entstehen Abweichungen von den realen Verhältnissen aus der oft erforderlichen räumlichen und zeitlichen Interpolation bzw. Disaggregation von Daten, z. B. zum Füllen von Lücken bzw. zur Regionalisierung von Informationen (was genau genommen auch eine Modellierung ist, eine Modellierung vor der Modellierung). Soweit Szenarien angesetzt werden, ist deren Eintreffen an sich ungewiss, aber auch die innere Konsistenz aller Komponenten, etwa eines Klimaszenarios, ist nicht notwendigerweise sichergestellt.
2. Unsicherheit der Prozessabbildung: Zuerst zu nennen ist hier die sogenannte strukturelle Unsicherheit der Modelle. Welche Prozesse und Kopplungen werden auf welchen Skalen explizit formuliert, welche können vernachlässigt oder zusammenfassend parametrisiert werden? Dabei ist es grundsätzlich möglich, dass zukünftig bzw. unter noch nicht beobachteten Umständen Prozesse oder Kopplungen relevant werden, die in der Vergangenheit bisher keine oder eine zumindest in erster Näherung vernachlässigbare Rolle gespielt haben. Umgekehrt ist es genauso möglich, dass Prozessformulierungen, die gegenwärtig gültig sind, zukünftig ungültig werden könnten (insbesondere dann, wenn sie empirisch abgeleitet und wenig physikalisch basiert sind).

Hinzu kommt, dass Systemmodelle der natürlichen Umwelt praktisch immer Verkettungen bzw. Vernetzungen vieler verschiedener Prozessmodelle sind. Sie beschreiben sowohl Interaktionen unterschiedlicher Prozesse an einem Ort als auch die Interaktion gleichartig vernetzter Prozesse benachbarter Orte.

Ein noch häufiges Problem ist der Umstand, dass in Modellketten, etwa für Untersuchungen zu Klimafolgen, oft keine Rückkopplungen über sektorale Modellgrenzen hinweg vorgesehen sind. Man denke z. B. an die Modellierung der Meteorologie in Klimamodellen, die ebenso wie das nachfolgend eingesetzte hydrologische Modell auch den Wasserkreislauf über Landflächen abbildet, ohne dass die von beiden Modellen berechneten Zustandsvariablen und Flussgrößen abgeglichen würden (Verdunstung, Bodenfeuchte, Schneebedeckung, Oberflächenabfluss etc.).

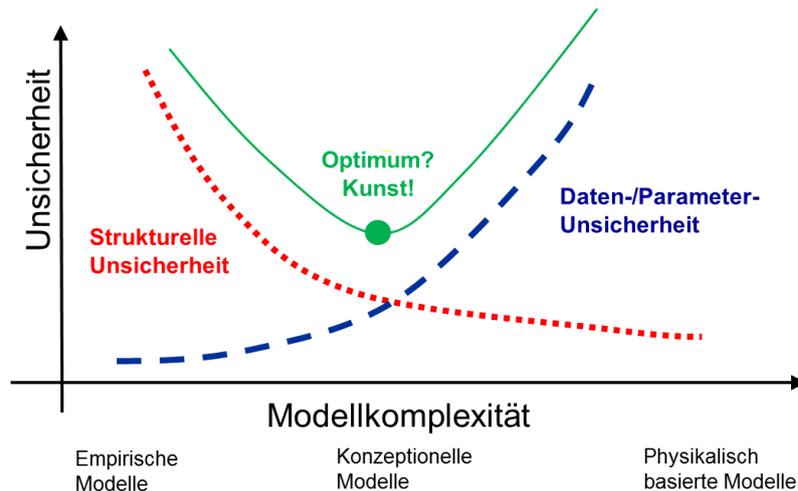
### **Detailierung ≠ Genauigkeit**

Wichtig ist es, sich klarzumachen, dass Modelle durch zunehmende Detaillierung (höhere räumliche und zeitliche Auflösung und/oder Zahl der abgebildeten Prozesse) nicht unbedingt genauer werden. Grund dafür ist die Fehlerfortpflanzung. Denn Detaillierung bedeutet mehr und vielfältiger miteinander verknüpfte Zustandsvariablen. Aufgrund der Daten- und Prozessunsicherheit können die Gesetzmäßigkeiten für den Zusammenhang zwischen den Zustandsvariablen jedoch nur mit endlicher Genauigkeit beschrieben werden. Daher kann bei lückenhafter und damit ungenauer Datenlage eine hohe Detaillierung infolge von Fehlerfortpflanzung zu größerer Ungenauigkeit führen als bei geringerer Detaillierung. Dies gilt in

besonderem Maße für natürliche Systeme, die wir im Gegensatz zu menschengemachten (technischen) Systemen<sup>1</sup> kaum jemals vollständig beschreiben und beobachten können. Um damit umzugehen, müssen Sensitivitätsuntersuchungen vorgenommen werden, um herauszufinden, welche Prozesse und Parameter die interessierenden Zielgrößen am empfindlichsten beeinflussen und wie sich die Modellauflösung auf diese Empfindlichkeiten auswirkt.

Die gesamte Unsicherheit eines Modells setzt sich aus zwei sich gegenläufig entwickelnden Unsicherheiten zusammen. Während die strukturelle Unsicherheit i.d.R. mit zunehmender Modellkomplexität abnimmt (da die Realität in immer größerem Detail abgebildet wird), nimmt die Daten- und Parameterunsicherheit mit zunehmender Modellkomplexität i.d.R. zu – allerdings abhängig von der Datenlage früher oder später (Abb. 2). Die Kunst besteht darin, für ein gegebenes Problem und eine gegebene Datenlage eine angemessene Modellkomplexität zu wählen, so dass die gesamte Modellunsicherheit möglichst minimal wird (Abb. 2).

In jedem Fall ist darauf zu achten, dass die dominanten Prozesse vom Modell repräsentiert werden, um sicherzustellen, dass ein gutes Ergebnis aus dem richtigen Grund erzielt wird.



**Abb. 2:** Gesamtunsicherheit eines Modells als Summe aus struktureller und Daten- bzw. Parameterunsicherheit als Funktion der Modellkomplexität, schematisch

Einhergehend mit dem Anspruch, die dynamischen Systeme unter Einbeziehung sowohl ökonomischer als auch ökologischer Aspekte immer detaillierter zu managen und ausreizen zu können, geht der Trend zu Modellen immer komplexerer Systeme und immer höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung. Man denke nur an das Management eines so dynamischen Systems wie dem Elbe-Ästuar, wo bei hochkomplexer Morphologie in einem sehr fragilen Ökosystem Fahrrinnenvertiefungen und optimierte Baggergutmanagementstrategien unter Beachtung von Gewässergütefragen und unter Einhaltung von ökologischen Rahmenbedingungen unter einen Hut gebracht werden sollen. Insbesondere in derart komplexen Fällen ist die ausreichende Verfügbarkeit von beobachteten Daten das A und O, um die Modellunsicherheiten in den Griff bekommen zu können.

<sup>1</sup> Da technische Systeme von Menschen entworfen und kontrolliert werden, können Daten zu Geometrie und Materialeigenschaften den Planunterlagen sowie Zustandsdaten Betriebsaufzeichnungen entnommen werden – zumindest prinzipiell.

## 4 Datenverfügbarkeit

Datenverfügbarkeit hat viele Dimensionen. Die Identifizierung relevanter Daten steht und fällt mit den Möglichkeiten, sie aufzufinden. Am einfachsten gelingt dies über integrierte Datenkataloge, die nach internationalen Standards (z. B. ISO 19100 Series) angelegt sind und in Standard-konformen Clients die Recherche in einem Raum- und Zeitfenster sowie mit einem thematischen Bezug erlauben, letzterer idealerweise gemäß standardisierten mehrsprachigen Thesauri. Leider sind viele Daten bis auf weiteres nur durch zeitaufwändiges Durch- und Nachfragen zugänglich und erfordern u. U. erhebliche Nachprozessierungsschritte. Weiterhin sind Nutzerrechte sowie ggf. Nutzungs- und Bereitstellungskosten zu klären. Sofern keine Informationen zur Datenqualität vorliegen, ist diese zu prüfen. Schließlich spielt die Zugriffsgeschwindigkeit auf Daten oft eine entscheidende Rolle. Denn viele Projekte haben typische Laufzeiten von drei oder fünf Jahren und die Zeit, die für Datenrecherche aufgebracht werden kann, ist begrenzt. Wenn man dann auf gut gemanagte und dokumentierte Datenbestände aufsetzen kann, ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass man einen Großteil der problemrelevanten Daten auffinden und verarbeiten kann. Aber auch im Fall elektronisch verwalteter Daten sind die technischen Möglichkeiten zu unterscheiden, wie auf die Daten zugegriffen werden kann. Oft müssen Daten einzeln und händisch heruntergeladen werden (Mensch-zu-Maschine-Kommunikation), in anderen Fällen besteht die Möglichkeit, große Datenmengen automatisiert zu verarbeiten, möglicherweise sogar, ohne sie explizit herunterladen zu müssen (Maschine-zu-Maschine-Kommunikation). Der Fortschritt bei der Modellierung und damit dem Management der aufgrund unserer Ansprüche tendenziell immer komplexer zu betrachtenden Systeme hängt entscheidend von der Fortentwicklung des Datenmanagements ab (s. a. MAURER 2013).

## 5 Modelle für Systeme der Wasserbewirtschaftung

In Modellen für Wasserbewirtschaftungsfragen kommt zu den Prozessen und Daten für natürliche Systeme eine eigene Kategorie von Prozessen und Daten hinzu. Für eine erfolgreiche Modellierung sind hier zusätzlich die Bewirtschaftungsregeln der Anlagen für die Wasserbewirtschaftung sowie Zeitreihen der tatsächlichen Nutzungen, Steuerungen und Betriebszustände unabdingbar (vgl. HOHENRAINER (2017, s. S. 32ff.) und RICHTER (2017, s. S. 57ff.)). Im Vergleich zu den ursprünglich natürlichen Systemen, aus denen das zu bewirtschaftende Wasser überwiegend stammt, handelt es sich bei Anlagen um weniger komplexe Teilsysteme, da sie durch Menschen erdacht, geplant, gebaut und betrieben werden und ihre Daten daher grundsätzlich vollständig erfassbar sein können. Klassischerweise sind Bewirtschaftungsdaten gegebene Randbedingungen (die jedoch ggf. invers und iterativ aus Regeln und Zustandsdaten ermittelt werden müssen, wenn Nutzungen, Steuerungen und Betriebszustände nicht aufgezeichnet wurden). Eine vergleichsweise neue Entwicklung ist es, die Prozesse, die zur Entwicklung von Steuerungsstrategien führen, in das zu modellierende System einzubeziehen, d. h. menschliches Entscheidungsverhalten ebenfalls zu modellieren (Agenten-/Akteursbasierte Modellierung, Sozio-Hydrologie, s. z. B. SIVAPALAN & BLÖSCHL 2015).

Im Zusammenhang mit der Wasserbewirtschaftung können zwei grundsätzliche Fragestellungen mit zwei unterschiedlichen Zeithorizonten unterschieden werden:

1. Wie steuern wir das System (jetzt)? Was lässt sich kurzfristig vorhersagen?
2. Wie entwickeln wir das System (zukünftig weiter)? Wie passen wir es langfristig an veränderte Verhältnisse und Bedürfnisse an?

Daraus resultieren unterschiedliche Anforderungen an Daten und Modelle.

Im ersten Fall (der Steuerung des Systems in den nächsten Stunden und Tagen) geht es ausgehend vom bekannten Anfangszustand und unter vergleichsweise genau bekannten Randbedingungen um die Vorhersage für die Optimierung der Systemsteuerung (etwa Einhaltung von Betriebswasserständen und Bestimmung von hinsichtlich des Energieverbrauches optimierter Steuerung von Pump- und Entlastungswassermengen). Da Modellsimulationen nach relativ kurzer Zeit überprüft werden können, steht hier die Güte der Vorhersage im Vordergrund und nur in zweiter Linie die richtigen Gründe dafür.

Im zweiten Fall (der Weiterentwicklung des Systems auf lange Sicht) geht es um die Untersuchung längerfristiger Entwicklungen und ggf. notwendiger Anpassungen, etwa aufgrund veränderter klimatischer Bedingungen oder Bewirtschaftungsziele. Maßgebend sind hier in der Regel auch andere Kenngrößen, z. B. über größere Zeiträume ermittelte Anzahlen kritischer Betriebszustände. Wichtiger als die Anfangsbedingungen ist für solche Untersuchungen die Entwicklung der Randbedingungen über lange Zeiträume, z. B. des Wasserdargebots unter Klimaänderung, des Verkehrsaufkommens, des Wasserbedarfs von Wassernutzern oder der Energiekosten. Die Überprüfung entsprechender Szenarienrechnungen ist erst lange nach der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen möglich (und das auch nur, wenn Monitoring-Maßnahmen ergriffen wurden<sup>2</sup>). Im Vordergrund steht daher die größtmögliche strukturelle Richtigkeit des verwendeten Modells, so dass darauf vertraut werden kann, dass das Modell auch unter Bedingungen außerhalb des Erfahrungsbereiches gute Ergebnisse liefert (Extrapolation). EBNER VON ESCHENBACH (2017, s. S. 93ff.) stellt konkrete Beispiele aus der Arbeit der BfG für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung dar.

## 6 Zusammenfassung und Fazit

Modelle stellen ein vereinfachtes Abbild eines Ausschnitts der Realität dar und müssen immer an gemessene Daten angepasst werden. Modellbildung kann als strukturierter gemeinsamer Beobachtungs- und Denkprozess einer Vielzahl von Individuen aufgefasst werden, der dazu beiträgt, Erfahrungswissen (Bauchgefühl) zu objektivieren und es transparent und über Raum und Zeit hinweg kommunizierbar zu machen. Modelle können als Versuch bestmöglicher Interpolation innerhalb bekannter gemessener Daten aufgefasst werden. Bei gegebener Datenlage ist das Vertrauen, dass das Modell auch für die Untersuchung bisher unbeobachteter Ereignisse bzw. zur Projektion möglicher Szenarien in die Zukunft verwendet werden kann (Extrapolation) umso größer, je mehr Strukturwissen in die Modellbildung einbezogen werden kann.

Beim Aufbau von Modellen muss einerseits die Komplexität der Fragestellung und andererseits die Datenverfügbarkeit berücksichtigt werden. Die Detaillierung eines Modells sowohl

---

<sup>2</sup> Monitoring sowohl der tatsächlichen Entwicklung der Randbedingungen, für die Szenarien angenommen, als auch der Auswirkung auf das betrachtete System.

hinsichtlich der abgebildeten Prozesse als auch der gewählten zeitlichen und räumlichen Auflösung muss dabei neben den Anforderungen der Fragestellung in einem gesunden Verhältnis zu den verfügbaren Messdaten stehen. Zu einfach strukturierte Modelle ebenso wie (im Verhältnis zur Datengrundlage) überparametrisierte Modelle erhöhen die Modellunsicherheit. Es ist die Kunst des Modellierers, hier eine vernünftige Balance zu finden. Die verfügbaren Ressourcen (Geld, Zeit) können eine weitere Einflussgröße sein, die das Machbare beschränkt. In jedem Fall ist es wichtig, die Grenzen der Aussagefähigkeit eines entwickelten Modells zu beschreiben, z. B., indem in Sensitivitätsuntersuchungen die Abhängigkeit der Aussagen für die Zielgrößen von der Modellkomplexität und der Datensituation untersucht wird.

Das Ziel ist es, Problemstellungen zu lösen. Hierfür werden Modelle aufgestellt und vorgehalten. Unabdingbare Voraussetzung dafür ist es jedoch, dass ausreichend Daten erhoben und verfügbar gemacht werden, im Fall von Bewirtschaftungsproblemen auch Daten zu den Betriebszuständen und durchgeführten Steuerungen. Modelle – und ebenso Informationssysteme – sind am Ende nur Front-Ends (oder neudeutsch: Apps) auf gut organisierte Datenbestände. Je besser die Daten gehalten werden, desto einsatzbereiter können Modelle für Beratungszwecke zur Verfügung stehen.

## Literatur

- BEVEN, K. J. (2012): Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. Wiley-Blackwell, 2. erweiterte Auflage
- BOSEL, H. (1992): Simulation dynamischer Systeme. Grundwissen, Methoden, Programme. 2. verbesserte Aufl., Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D. (2017): Wassermengenbewirtschaftung von Bundeswasserstraßen – Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 93-105
- HOHENRAINER, J. (2017): Wasserbewirtschaftungsdaten – Grundlage für Systemverständnis und Modellierung. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 32-43
- KLEMEŠ, V. (2000): Risk Analysis: The Unbearable Cleverness of Bluffing. In: C. D. Sellars (Hrsg.): Common Sense and other heresies – Selected Papers on Hydrology and Water Resources Engineering. Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ontario, Canada, 2000, pp. 197-209. ISBN 1-896513-18-2
- MAURER, T. (1997): Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Band 61, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/65797/1262650> (letzter Zugriff am 12.04.2017)

- MAURER, T. (2013): Wissensmanagement: Voraussetzung für Leistungsfähigkeit. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG. Kolloquium am 15./16. Mai 2013 in Koblenz. Veranstaltungen 4/2013, Koblenz, Mai 2013, 164 S., URL: [http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst4\\_2013.pdf](http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst4_2013.pdf) (letzter Zugriff am 12.04.2017)
- RICHTER, K. (2017): Szenarien zur Wassernutzung – projektspezifische Erfahrungen und Erkenntnisse. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 57-67
- SIVAPALAN, M., G. BLÖSCHL (2015): Time scale interactions and the coevolution of humans and water, *Water Resour. Res.*, 51, 6988–7022, doi:10.1002/2015WR017896
- TALEB, N. N. (2008): *Der Schwarze Schwan: Die Macht höchst unwahrscheinlicher Ereignisse*. Hanser

**Kontakt:**

**Dr.-Ing. Thomas Maurer**

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261/ 1306 5242

E-Mail: [thomas.maurer@bafg.de](mailto:thomas.maurer@bafg.de)

# Wassermengenbewirtschaftung von Bundeswasserstraßen – Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung

Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach

## 1 Wassermengenbewirtschaftung in Stauhaltungen

Die schiffbaren Flüsse und Kanalstrecken in Deutschland umfassen eine Länge von 7.350 km, wovon etwa 3.000 km staugeregt sind. Stauhaltungen werden unterschieden in Flusstauhaltungen eines natürlichen Gewässerabschnitts und in Kanalstauhaltungen, die künstlich errichtet worden sind. Stauhaltungen stellen ein offenes weitverzweigtes System aus Wasserkörpern verschiedener Höhenlagen dar, die durch ein oder mehrere (Absperr-)Bauwerke wie Schifffahrtsschleusen, Wehre, Entlastungsanlagen zur Bewirtschaftung, Pumpwerke oder Kraftwerke zur Energiegewinnung miteinander verbunden sind.

Die Bewirtschaftung der Stauhaltungen erfolgt prioritär entsprechend den Anforderungen der Schifffahrt, gleichwohl werden dabei (soweit wie möglich) auch die Interessen anderer Nutzungen der Wasserstraße wie die Energiewirtschaft, die Industrie, die Landwirtschaft, Tourismus und Umwelt (Schutz, Ökologie) berücksichtigt. Bewirtschaftung wird immer dann notwendig, wenn das natürlich vorhandene Wasserdargebot in seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung nicht dem jeweiligen Wasserbedarf in Menge und Beschaffenheit entspricht. Da die Konstellationen dieser beiden Größen in verschiedenen Teilen Deutschlands ganz unterschiedlich sind, fallen auch die Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Umverteilung des Wassers regionspezifisch verschieden aus.

Das Ziel der Bewirtschaftung einer Stauhaltung für die Schifffahrt und zur Anlagensicherheit ist eine Regulierung des (Ziel)-Wasserstandes so, dass dieser sich innerhalb der Lamelle zwischen unterem (BWU) und oberem Bewirtschaftungswasserstand (BWO) befindet. Diese Lamelle ist für das Kanalnetz nur wenige Dezimeter breit (siehe BWU und BWO in den rechten Abb. 3 (S. 101) und 4 (S. 102)). Die Regulierung des Wasserstandes erfolgt zum Beispiel mit Hilfe von Pumpwerken und Entlastungsanlagen. Diese dienen dazu, einen Ausgleich zwischen den dargebotserhöhenden und -reduzierenden Bilanzgrößen einer Kanalhaltung (s. Kapitel 3) innerhalb einer Zeitspanne von wenigen Stunden zu schaffen.

Die Bewirtschaftung von Stauhaltungen kann auf unterschiedliche Zeithorizonte fokussieren und damit verschiedene Zielvorstellungen adressieren: (a) bestmöglicher Betrieb des wasserwirtschaftlichen Systems im Sinne einer kurzfristigen Wasserbewirtschaftung im operationellen Betrieb und (b) Weiterentwicklung des wasserwirtschaftlichen Systems über Szenarien-

rechnungen im Sinne von Langzeitsimulationen zur vorausschauenden Wasserbewirtschaftung. Im Fokus der weiteren Darstellungen stehen (b) die Langzeitsimulationen zur vorausschauenden Wasserbewirtschaftung.

## 2 Herausforderungen bei der Modellierung

### 2.1 Wassernutzungsdaten

Unabdingbare Voraussetzung jeglicher Modellierung sind Daten, die den Wasserbedarf der Nutzer (wie z. B. Schifffahrt, Energieversorgung, Industrie, Landwirtschaft, Tourismus, Umwelt) in Raum, Zeit und Höhe (Menge) widerspiegeln. Im besten Fall (auch zur Veranschaulichung ihrer zeitlichen Veränderung) sind dies kontinuierliche Wertereihen von Entnahme- bzw. Einleitungsmengen in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung von Minuten- bis Jahreswerten, die durch die Betreiber, die zuständigen Institutionen oder Behörden entsprechend eigener Vorgaben erfasst werden.

Der Einsatz dieser Daten in der Modellierung (z. B. als Randbedingung, Zustandsvariable oder zur Validierung von Simulationsergebnissen) erfordert vorweg die Beschaffung, Aufbereitung, Umformatierung, Plausibilisierung und Ablage. Der Ablauf aller Teilschritte ist bei direktem Kontakt zu den datenerhebenden Betreibern ein beidseitig zeit- und ressourcenbindender Prozess, der mit größer werdendem Untersuchungsgebiet zunimmt. Im Folgenden werden Aspekte der Teilschritte Beschaffung/Ablage und Plausibilisierung kurz umrissen:

#### **Zentrale Datenhaltung:**

In überregional agierenden Institutionen bzw. Behörden wird zumeist die zentrale (im besten Fall auch automatisiert organisierte) Datenhaltung zur Erhöhung der Nachhaltigkeit, Transparenz und Effizienz favorisiert. Mit der Datenbündelung an zentraler Stelle reduziert sich damit mittel- bis langfristig auch der Aufwand für die Datenbeschaffung. Beispielhaft genannt ist hier das zentrale Informationssystem ÜWA der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (siehe Details in ROTH 2017, s. S. 44ff.).

Bei der Modellierung des anthropogen geprägten Wasserhaushalts von großen Flusseinzugsgebieten ist die Datenbeschaffung direkt vom Nutzer aufgrund des Aufwands fast unmöglich. Vor diesem Hintergrund untersucht die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) gegenwärtig als Alternative die Verwendung von Umweltdaten aus der amtlichen Statistik. Hierbei sind jedoch wiederum die Randbedingungen der Erhebungen zu beachten (Jahreswerte, Periodizität, räumliche Skala, Detaillierungsgrad) sowie die mehr oder weniger umfangreichen erforderlichen Nachprozessierungsschritte. Weiterführende Informationen zu dieser Thematik gibt BODENSEH (2017, s. S. 51ff.).

#### **Plausibilisierung**

Verlässliche Bewirtschaftungsdaten sind eine Grundvoraussetzung der wasserwirtschaftlichen Untersuchung. Die Plausibilisierung der Daten kann anhand statistischer Kenngrößen, über den Vergleich von Größenordnungen oder über die Prüfung der zeitlichen Dynamik erfolgen. Weitere Details beschreibt HOHENRAINER (2017, s. S. 32ff.).

Die Daten des Wasserbedarfs sind genau genommen Ergebnisse der Handlungsstrategien einzelner Nutzer. Damit eröffnet sich als alternativer oder ergänzender Weg die aktorsbasierte Modellierung (siehe z. B. MAUSER et al. 2016 oder DÖLL 2010). Diese versucht, die Handlungsstrategien des Nutzers unter Berücksichtigung der treibenden Kräfte, möglicher Zielkonflikte und Handlungskombinationen zu simulieren. Dieser Ansatz erfordert jedoch tieferes Systemwissen für die Handlungen des Nutzers (sozio-ökonomische Modellierung). Der damit verbundene größere Aufwand in der Modellierung (und die zusätzliche Unsicherheit) sollte mit seinem Nutzen für die Beantwortung der wasserwirtschaftlichen Fragestellung abgewogen werden.

## 2.2 Ableitung von Regeln zur Wasserbewirtschaftung

Die Regeln der Wasserbewirtschaftung sind – neben den Daten zur Wassernutzung – ebenso unerlässlich für die Modellierung. Verstanden werden hierunter beispielsweise die Regulierung des Wasserstandes in einer Flusstauhaltung über Wehre, die Speisung von defizitären Kanalabschnitten mit Wasser aus sich unterhalb befindenden Wasserkörpern über Pumpwerke bzw. aus oberhalb liegenden Wasserkörpern im Freigefälle, die Steuerung von Talsperren oder Seen im Hochwasser- bzw. Niedrigwasserfall oder die gezielte Überleitung von Wasser von einem Einzugsgebiet in ein anderes Einzugsgebiet (wie z. B. bei der Fernwasserversorgung oder der Flutung von Bergbaufolgeseen).

Diese Regeln können zum Beispiel in Form von (Handlungs)-Anweisungen, (Verwaltungs)-Vereinbarungen oder Festlegungen dokumentiert sein. Je nach Detaillierungsgrad der Dokumentation existieren große oder weniger große Handlungsspielräume für die Bewirtschafter, die mit Fachwissen hinsichtlich der Steuerung und Reaktion des bekannten Systems bei verschiedenen hydrologischen Situationen gestaltet werden können. Es knüpft sich die Frage an, wie der Modellierer ein Gefühl für den Gestaltungsfreiraum einer situationsbedingten angepassten Bewirtschaftung des Systems erhält. Realisieren lässt sich dies über eine sorgfältige und akribische Auswertung von Nutzerdaten oder hydrologischen Daten von Pegeln, die entweder räumlich ober- und unterhalb der Bewirtschaftungsmaßnahme liegen oder jedoch bereits zeitlich vor der (Veränderung) der Steuerung errichtet wurden (s. HOHENRAINER 2017).

Die Regeln der tatsächlichen Wasserbewirtschaftung sind zur Implementierung in das (Bewirtschaftungs)-Modell zu modellieren und zu parametrisieren. Im günstigen Fall liegen hierfür die oben erwähnten Dokumentationen zur Steuerung vor, für die dann die entsprechenden Algorithmen abgeleitet werden. Je weiter die reale (tatsächliche) Steuerung des Systems jedoch von den dokumentierten oder abgeleiteten Regeln abweicht und eher vom Erfahrungsschatz des Bewirtschafters geprägt ist, desto schwieriger wird es, hierfür funktionale, übergeordnet gültige Zusammenhänge zu finden. Die Erarbeitung dieser Zusammenhänge kann jedoch gelingen, wenn Modellierer und Bewirtschafter in dieser Angelegenheit eine ziel- und dialogorientierte Kommunikation pflegen. Die Auseinandersetzung von Bewirtschafter und Modellierer führt zu einer Objektivierung und damit personenunabhängigeren Kommunizierbarkeit von Erfahrungswissen.

## 2.3 Definition von Szenarien

Grundsätzlich sind Szenarien immer dann notwendig, wenn Aussagen zur (Weiter)-Entwicklung eines (wasserwirtschaftlichen) Systems unter veränderten gegenwärtigen oder zukünftig möglichen Randbedingungen untersucht werden sollen. Je nach Zeithorizont sind hierfür

unterschiedliche Annahmen für alle das System beschreibende Faktoren (Wasserbedarf, Wasserdargebot, Steuerregeln der Bewirtschaftung, Systemzustände) notwendig. So erfordern beispielsweise Untersuchungen zu den Veränderungen eines wasserwirtschaftlichen Systems unter gegenwärtigen Randbedingungen, jedoch basierend auf einem variierten Wasserbedarf in Raum, Zeit und Höhe, nur Annahmen (Szenarien) zu dieser Einflussgröße (z. B. in Abb. 3, S. 101). Werden jedoch Aussagen zu den Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die gegenwärtige Bewirtschaftung (z. B. in Abb. 5, S. 102) notwendig, dann sind entsprechende Szenarien zum Wasserdargebot zu entwickeln.

Zur Illustration beispielhaft ausgewählt und in den rechten Spalten der Abbildungen 3 bis 5 dargestellt sind Szenarien, die im Zuge der Untersuchungen von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung durch die BfG entwickelt oder abgeleitet und angewendet wurden:

- > Abbildung 3 (S. 101): Annahmen zur Variation von maximalen Pumpkapazitäten
- > Abbildung 4 (S. 102): Annahmen zur Variation von Entwässerungskapazitäten an der kleinen Schleuse am Standort Brunsbüttel in Abhängigkeit der Differenz von Kanalwasserstand und Wasserstand in der Unterelbe
- > Abbildung 5 (S. 102): Annahme von möglichen klimatischen Entwicklungen bis 2100

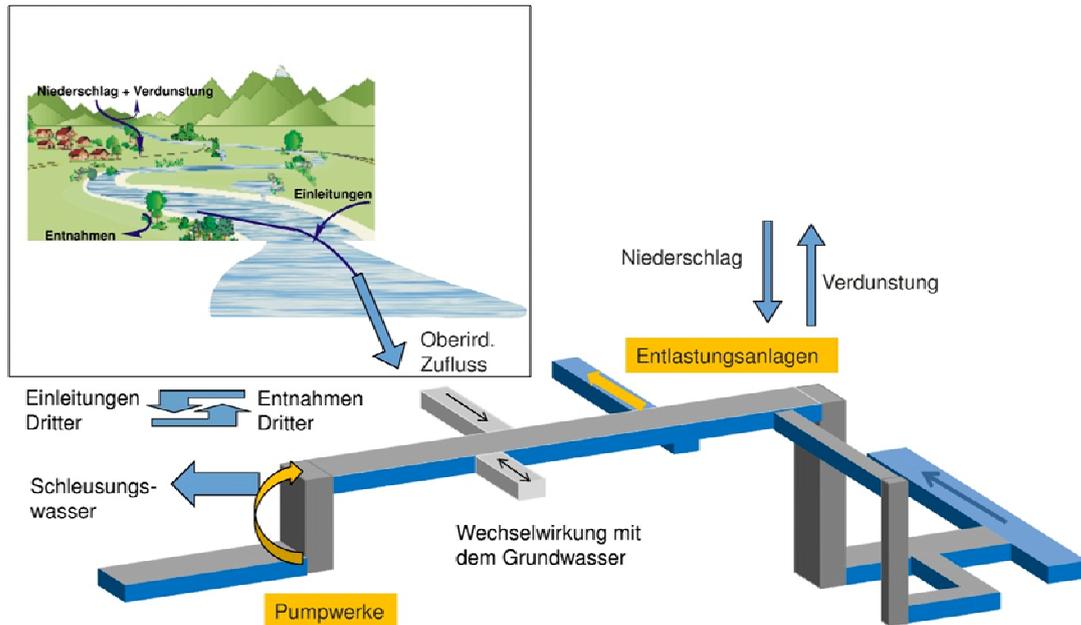
Weiterführende Informationen hierzu gibt RICHTER (2017, s. S. 57ff.).

## 3 Modellierung

### 3.1 Modellsystem BEWASYS

Die Modellierung der haltungsspezifischen Wasserbewirtschaftung stellt im Kern eine Bilanzierung der dargebotserhöhenden und -reduzierenden Größen über eine zu wählende Zeitspanne dar. Dargebotserhöhende Größen sind (in Orientierung an Abb. 1) zum Beispiel der Zufluss aus dem oberirdischen und unterirdischen Einzugsgebiet, Einleitungen Dritter und der Niederschlag auf die Kanaloberfläche. Dargebotsreduzierende Größen sind in diesem Beispiel das Schleusungswasser, der Abstrom ins Grundwasser, Entnahmen Dritter sowie die Gewässerverdunstung.

Diese Bilanzierung kann grundsätzlich sehr einfach mit Papier und Bleistift oder Excel durchgeführt werden. Dies ist bei Einzelfallbetrachtungen denkbar. Bei der Analyse von Systemen mehrerer wasserwirtschaftlich voneinander abhängiger Stauhaltungen wird empfohlen, ein entsprechendes Modellinstrumentarium zu verwenden, um die beschriebenen Wechselbeziehungen von Pumpwerken zur Speisung oder Anlagen zur Entlastung der Kanalstauhaltung für die Regulierung des (Ziel)-Wasserstandes abbilden zu können. Ein hierfür geeignetes Modellsystem, welches in der BfG zur (Langzeit)-Simulation der Wasserbewirtschaftung von Kanal- und Flusstauhaltungen unter gegenwärtigen oder zukünftig möglichen Randbedingungen zum Einsatz kommt, wird im Weiteren vorgestellt.



**Abb. 1:** Bilanzgrößen einer Kanalhaltung. Dargebots erhöhende Größen sind zum Beispiel der oberirdische und unterirdische Zufluss aus dem Einzugsgebiet, die Einleitung Dritter und der Niederschlag auf die Haltung. Dargebots reduzierende Größen sind beispielhaft das Schleusungswasser, die Entnahme Dritter, der Abstrom ins Grundwasser und die Gewässerverdunstung. Mit Hilfe der Pumpwerke und Entlastungsanlagen erfolgt eine Regulierung des (Ziel)-Wasserstandes.

Das Modellsystem BEWASYS (*BE*wirtschaftung *WA*sserwirtschaftlicher *SY*steme) ist ein Werkzeug zur Simulation der Bewirtschaftung gesteuerter wasserwirtschaftlicher Systeme (wie zum Beispiel Kanal- und Flusstauhaltungen, Talsperren). Es wurde vor mehr als einem Jahrzehnt am Institut für Wasser- und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit dem Ruhrverband entwickelt (siehe hierzu auch Dissertation von BRUDY-ZIPPELIUS 2003). Seither wurde das Modellsystem im Rahmen mehrerer Aufträge durch die BfG wesentlich verfeinert. Detaillierte Erläuterungen zur Weiterentwicklung sind dokumentiert in EBNER VON ESCHENBACH et al. (2011).

Der Aufbau des Modells erfolgt sinnbildlich durch die Verknüpfung unterschiedlicher linienförmiger Modellbausteine wie frei fließende Gewässerstrecken sowie Kanal- und Flusstauhaltungen. Die linienförmigen Modellbausteine können beliebig miteinander kombiniert und durch punktförmige Elemente wie Talsperren, Schleusenstandorte, oberirdische und unterirdische Seitenzuflüsse, Entnahmen und Rückleitungen sowie Wehre und Pumpwerke weiter spezifiziert werden. Da es kaum möglich ist, alle denkbaren unterschiedlichen anwenderspezifischen Ansprüche an die Steuerung von Kanal- und Flusstauhaltungen und Talsperren mit vorab formulierten Regeln abzudecken, wurde bereits bei der Erstentwicklung des Modells eine offene Programmierschnittstelle zur flexiblen Implementierung beliebiger Steuervorschriften (im vorliegenden Fall in erster Linie zur Festlegung einer Rangfolge, in der die Pumpwerke zur Speisung von defizitären Haltungen oder in der die Entlastungsanlagen zur Reduzierung des Wasserstandes in Haltungen mit einem Wasserüberschuss herangezogen werden) geschaffen.

Ziel der Modellierung ist es, bei auftretenden Defiziten die Pumpwerke und Entlastungsanlagen an jeder Kanalstauhaltung so zu steuern, dass unter Beachtung ihrer Kapazitäten der (Ziel)-Wasserstand der Stauhaltung eingehalten werden kann. Die Steuerung der Pumpen erfolgt grundsätzlich nach einer im Vorfeld festgelegten und allgemein überregional gültigen Prioritätenreihenfolge ohne Beachtung anderer Alternativen, die sich in Abhängigkeit der hydrologischen Situation an manchen Tagen bieten könnten und ggf. plausibler wären.

Der (Berechnungs)-Ablauf von BEWASYS lässt sich vereinfacht in drei Schritten darstellen:

### **1. Schritt: Bilanzierung**

Alle (beobachteten oder modellgestützt abgeschätzten) dargebotserhöhenden und -reduzierenden Größen werden für alle Haltungen (jedoch haltungsspezifisch) in einem Zeitschritt in einen Volumenstrom (pro Zeiteinheit) umgerechnet und anschließend aufsummiert, wobei die dargebotserhöhenden Größen mit einem positiven Vorzeichen in die Addition eingehen und die dargebotsreduzierenden Größen mit einem negativen Vorzeichen.

### **2. Schritt: Vergleich mit (Ziel)-Volumen**

Der sich aus Schritt 1 ergebende differenzierte Volumenstrom der Haltung im aktuellen Berechnungszeitschritt wird auf den Volumenstrom des vorherigen Berechnungszeitschrittes addiert. Das Ergebnis der Addition wird verglichen mit dem (Ziel)-Volumen, welches wiederum durch den entsprechenden (Ziel)-Wasserstand definiert ist: Ist das bilanzierte Volumen geringer als das (Ziel)-Volumen, hat die Haltung ein Defizit (in der Konsequenz dargestellt durch sinkende Wasserstände). Ist das Volumen größer als das (Ziel)-Volumen, hat die Haltung einen Überschuss (in der Konsequenz steigende Wasserstände). Die Haltungsbilanz ist ausgeglichen, wenn beide Volumina identisch sind.

### **3. Schritt: Bewirtschaftung der Haltung**

Im Falle einer defizitären Stauhaltung (außer Scheitelhaltung) wird zuerst geprüft, ob überschüssiges Wasser aus oberhalb liegenden Haltungen zur Speisung des Defizites zur Verfügung steht. Ist dieses nicht der Fall, wird nach der im Vorfeld definierten festen Reihenfolge (dies gilt für alle Kanalhaltungen einschließlich der Scheitelhaltung) der verschiedenen Pumpwerke Wasser aus den unterhalb liegenden Haltungen in die defizitäre Haltung gepumpt. Die Zuführung von Wasser in einem Berechnungszeitschritt erfolgt so lange, bis das (Ziel)-Volumen (bzw. der entsprechende (Ziel)-Wasserstand) erreicht wird. Ist das bilanzierte Volumen dagegen größer als das Zielvolumen, wird das überschüssige Wasser in die sich unterhalb befindende Haltung entlastet.

## **3.2 Modelle BEWASYS Rhein-Oder & BEWASYS NOK**

### **3.2.1 Kanalsystem vom Rhein bis zur Oder**

Das Modellsystem BEWASYS wurde für das einzugs- und ämterübergreifende System der 33 Kanal- und Flusstauhaltungen vom Rhein bis zur Oder im Auftrag der GDWS, Standorte Mitte, West und Ost, aufgebaut und parametrisiert (EBNER VON ESCHENBACH et al. 2011). In Abb. 2 ist das Modellgebiet dargestellt. Dieses erstreckt sich vom Rhein in West-Ost-Richtung über die westdeutschen Kanäle, den Mittellandkanal und Elbe-Seitenkanal, den Elbe-Havel-Kanal, die Untere Havel-Wasserstraße, die Havel-Oder-Wasserstraße und die Spree-Oder-Wasserstraße bis zur Oder.

Zuflüsse in das Modell BEWASYS Rhein-Oder sind Tageswertreihen von Abfluss, Niederschlag, Gewässerverdunstung. Der Schifffahrtsbetrieb wird über die Anzahl der Schleusenkammerfüllungen beschrieben. Grundwasserzuflüsse, Entnahmen und Einleitungen Dritter werden in der Regel (entsprechend der Verfügbarkeit) als mittlere Monats- oder Jahreswerte berücksichtigt. Die im Modell implementierte Steuerungsstrategie zur Bewirtschaftung der einzelnen Stauhaltungen ist aus Betriebsvorschriften bzw. der Praxis abgeleitet.

BEWASYS Rhein-Oder besteht aus zwei Teilmodellen (in Abb. 2 hellgelb hinterlegt Teilmodell 1, blau hinterlegt Teilmodell 2). Teilmodell 1 umfasst den Bereich vom Rhein bis Berlin (Spandau). Teilmodell 2 den Berliner Raum (inklusive Obere Havel-Wasserstraße und Müritz-Havel-Wasserstraße, nicht dargestellt). Beide Teilmodelle können unabhängig voneinander simuliert werden. Teilmodell 1 benötigt jedoch für die Simulation drei Zuflüsse aus Teilmodell 2 (in Abb. 2 dargestellt mit drei Pfeilen: beobachtete oder simulierte Abflüsse aus SOW (Pegel Sophienwerder), UHW (Schleusungswasser Lehnitz und Pegel Sachsenhausen) und TeK (Pegel Kleinmachnow)).

Das Tagewertmodell BEWASYS Rhein-Oder wurde in der ersten Version für die Zeitspanne der hydrologischen Jahre 2000 bis 2010 aufgebaut und parametrisiert. Seitdem wurden im Zuge einzelner spezieller, zumeist räumlich begrenzter Fragestellungen für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung, in denen das Modell als Untersuchungsinstrument zur Anwendung kam, sowohl die Datenbasis für das Gesamtmodell fortgeschrieben als auch die bereits abgeleiteten Algorithmen zur modellgestützten Abbildung der Wasserbewirtschaftung hinsichtlich ihrer weiteren Gültigkeit überprüft und ggf. aktualisiert.

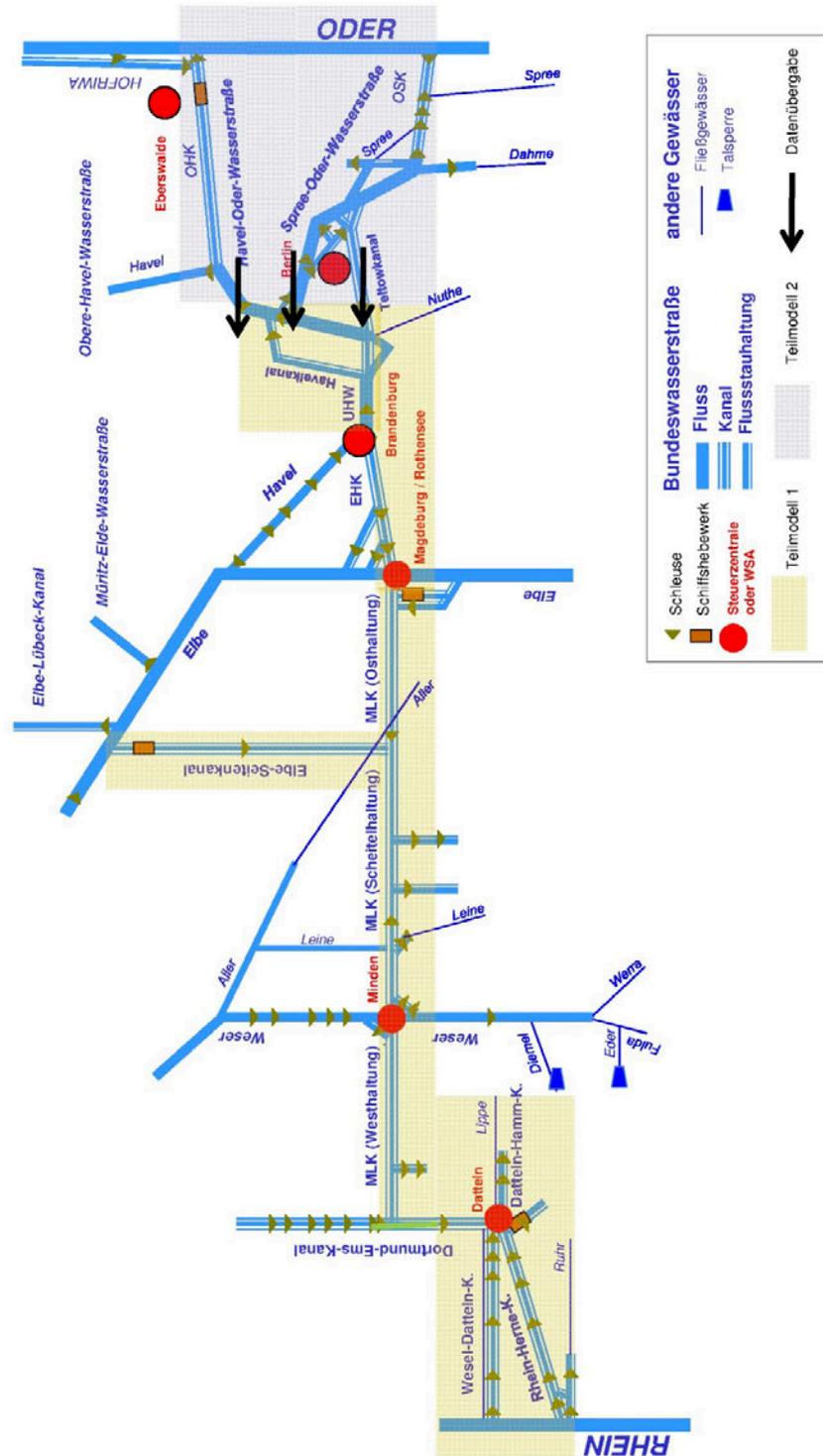
### **3.2.2 Nord-Ostsee-Kanal**

Für die Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals wurde das Modell BEWASYS NOK zur Simulation der Entwässerungsmengen an den Kanalenden Brunsbüttel und Kiel-Holtenau aufgebaut. Das Modell steuert auf einen (Ziel)-Wasserstand und simuliert im Gegensatz zum Modell für die Kanalstauhaltungen von Rhein bis zur Oder im Stundenzeitschritt die Entwässerungsmengen entsprechend eines vorgegebenen funktionalen Zusammenhanges zwischen Wasserstandsdifferenzen von Binnen- und Außenpegel und der Höhe der Entwässerungsleistung (siehe hierzu auch rechte Abb. 4, S. 102). Die Simulation im Stundenzeitschritt ist notwendig, um die tideabhängigen Prozesse abbilden zu können.

Weitere Informationen zu dieser Thematik können EBNER VON ESCHENBACH (2017, s. S. 114ff.) entnommen werden.

## **4 Möglichkeiten der Modellierung**

Mit den parametrisierten Modellen BEWASYS Rhein-Oder / NOK können Szenarien zum Wasserbedarf, zur Steuerung des Systems oder zum Wasserdargebot untersucht werden. Diese Szenarienrechnungen werden mit dem Ziel durchgeführt, die Auswirkungen der angenommenen Änderungen hinsichtlich der Einhaltung von Zielwasserständen (bzw. der Bewirtschaftungslamelle), der Höhe von Wasserentnahmen aus einem Gewässer zur Speisung von Kanalhaltungen bzw. der Auslastung von Pumpwerken und Entlastungsanlagen zu ermitteln.



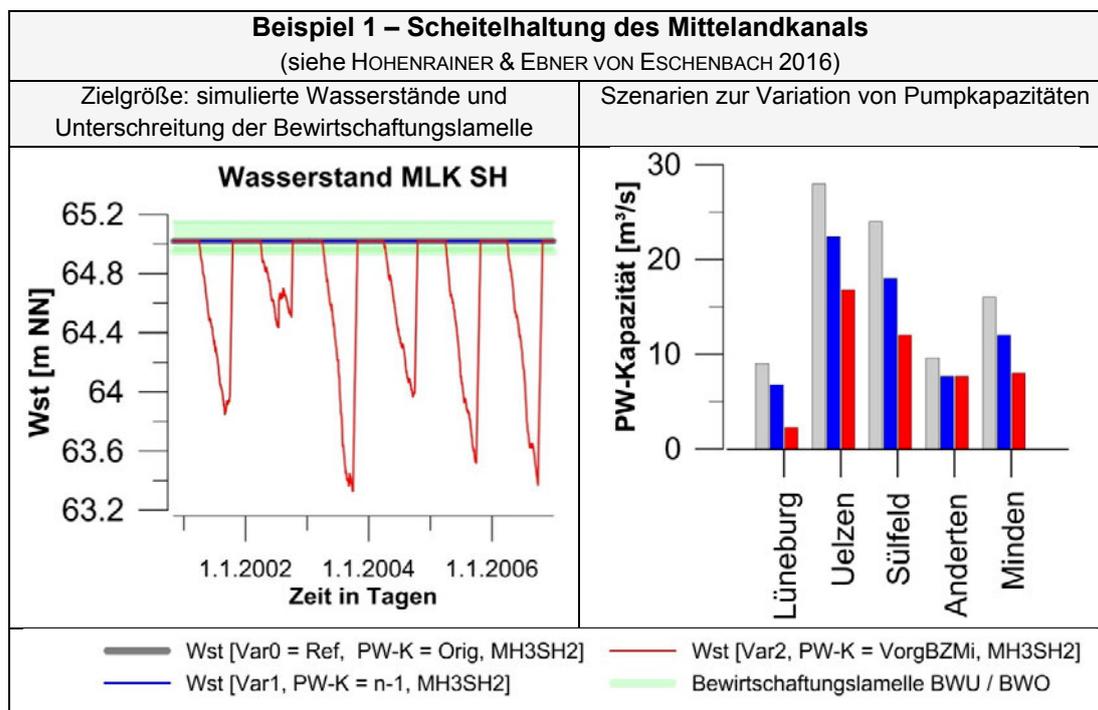
**Abb. 2:** Gestaute und nicht gestaute Bundeswasserstraßen. Systemskizze der Bundeswasserstraßenverbindung zwischen Rhein und Oder mit Angabe der für die Wassermengenbewirtschaftung zuständigen Betriebszentralen. Hellgelb hinterlegt ist Teilmodell 1 und blau hinterlegt ist das Teilmodell 2. Teilmodell 1 benötigt beobachtete oder simulierte Zuflüsse (mit drei Pfeilen symbolisiert) aus dem Teilmodell 2. Teilmodell 2 umfasst auch die hier nicht dargestellten Obere Havel-Wasserstraße und Müritz-Havel-Wasserstraße.

Diese Größen (Haltungswasserstände, Speisungsmengen, Pump- und Entlastungswassermengen) werden mit dem Modell je nach Fragestellung und Szenario für gegenwärtige oder zukünftige Verhältnisse simuliert. Über die Auswertung der simulierten Pumpwassermengen und Förderhöhen können zudem der Energieaufwand und daraus wiederum bei Vorliegen entsprechender Kostenfaktoren auch Pumpkosten der gerechneten Modellvariante abgeleitet werden.

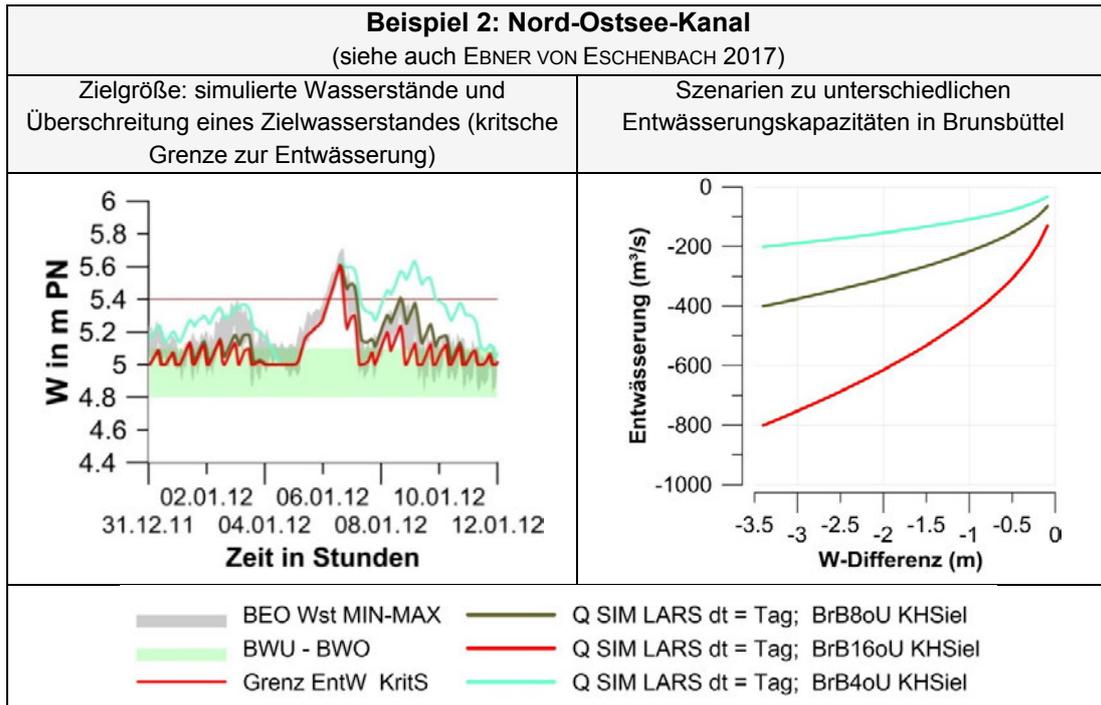
Aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen lassen sich Entscheidungshilfen für die Beurteilung von Änderungen (des Betriebs, der Anlagen, des Wasserdargebots oder der wasserwirtschaftlichen Nutzung) ableiten.

In den nachfolgenden Abb. 3 und 4 sind zum Zwecke der Illustration jeweils links die beispielhaft ausgewählten Zielgrößen Haltungs- bzw. (Ziel)-Wasserstände (Unterschreitung in Abb. 3, Überschreitung in Abb. 4) für den gegenwärtigen Systemzustand dargestellt. Die Abb. 5 zeigt links exemplarisch die Entwicklung der mittleren Entnahmen aus der Lippe am Wehr in Hamm im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) bis 2100, die zur Speisung der defizitären Scheitelhaltung des westdeutschen Kanalsystems dienen. Grundlage dieser Untersuchungen zu den Auswirkungen eines möglichen Klimawandels auf die Bewirtschaftung des westdeutschen Kanalsystems bilden fünf ausgewählte Klimaprojektionen (rechte Abb. 5), die eine Teilbandbreite möglicher Zukünfte umfassen (Details hierzu im Abschlussbericht, EBNER VON ESCHENBACH & RICHTER 2017, in Bearbeitung).

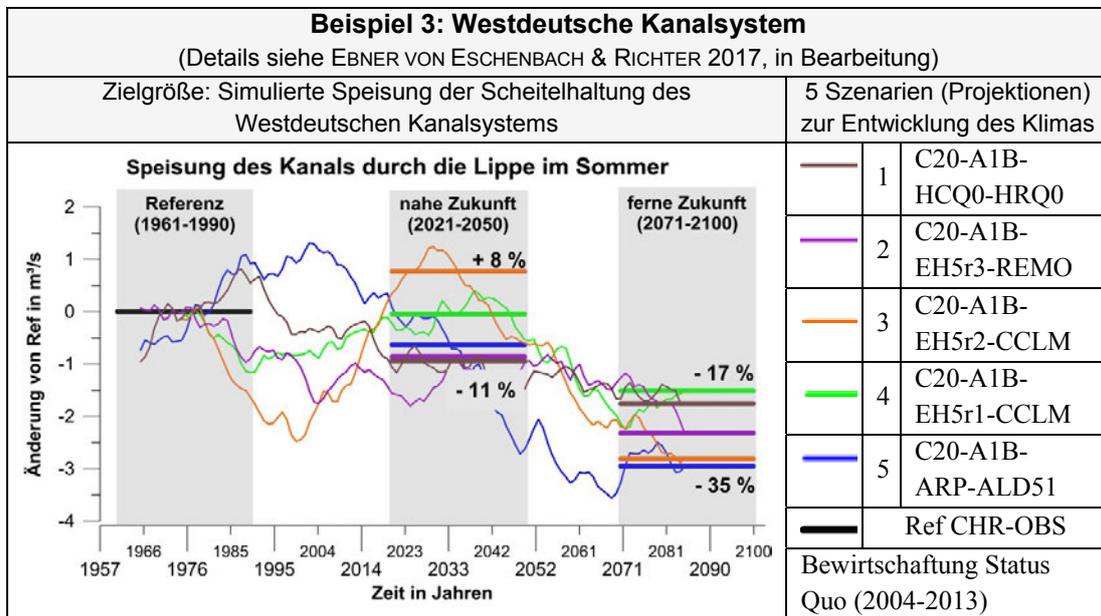
In den Abb. 3 bis 5 sind rechts jeweils die Szenarien dargestellt, die den Ergebnissen in den linken Abbildungen zugrunde liegen.



**Abb. 3:** Simulierte Wasserstände in der Scheitelhaltung des Mittellandkanals (MLK SH) (links, Wst) unter der Annahme der drei rechts dargestellten Szenarien mit unterschiedlichen Pumpkapazitäten. Allen drei Szenarien zugrunde gelegt sind die angenommenen Entnahmen für die landwirtschaftliche Beregnung von  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  aus der mittleren Haltung des Elbe-Seiten-Kanals (MH3) und von  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  aus der Scheitelhaltung des Mittellandkanals (SH2).



**Abb. 4:** Simulierte Kanalwasserstände im Januar 2012 (links) unter der Annahme verschiedener Entwässerungsleistungen am Standort Brunsbüttel (rechts): 4 Schütze jeweils ohne Umlauf (oU) BrB4, 8 Schütze BrB8, 16 Schütze BrB16. Die Entwässerung in Kiel-Holtenau (KH) erfolgt über das Siel. Die Zuflussganglinie aus dem Einzugsgebiet wurde mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM simuliert (nicht dargestellt).



**Abb. 5:** Simulation der mittleren Entnahmen aus der Lippe (am Standort Hamm) zur Speisung der defizitären Scheitelhaltung (links) basierend auf der Annahme von fünf verschiedenen Klimaprojektionen (rechts). Es wird angenommen, dass sich die Bewirtschaftung aus der Zeitspanne 2004 bis 2013 unverändert bis Ende 2100 fortsetzt.

## 5 Grenzen der Modellierung

Das Einsatzgebiet dieser vorgestellten Modelle sind Szenarienrechnungen (und somit Langzeitsimulationen) zur Weiterentwicklung des wasserwirtschaftlichen Systems im Zuge der vorausschauenden Wasserbewirtschaftung. Mit dem Ziel der Modellierung der Wasserbewirtschaftung werden Haltungswasserstände, Pumpwassermengen bzw. Entlastungs-(Entwässerungs)-wassermengen simuliert, die sich aus den nachfolgend vier genannten Gründen von den sich tatsächlich einstellenden Größen unterscheiden:

- 1) Die Zielgröße der modellgestützten Steuerung ist ein haltungsbezogener Wasserstand, der zwar innerjährlich variieren kann (z. B. bei Sommer- und Winterstau), jedoch für den Simulationszeitraum als konstant für eine Haltung angenommen wird. Diese Annahme ist gegenüber der Praxis idealisiert. Auftretende Schwankungen des gemessenen Wasserstandes bedingt durch den Schiffsverkehr, durch Schleusungs- und Entlastungsvorgänge oder durch die Streichlänge des Windes werden bereits innertäglich wirksam und können (und sollen auch) nicht mit den vorgestellten Modellen abgebildet werden. Das hat zur Folge, dass sich die tatsächlich einstellende innertägliche Steuerung von Pumpwerken und Entlastungs-(Entwässerungs)-anlagen, die eine Reaktion auf diese Einflussgrößen darstellt, modellgestützt nicht abgebildet wird.
- 2) Die modellierte Steuerung der Pumpwerke und Entlastungs-(Entwässerungs)-anlagen erfolgt nach fest definierten Regeln bzw. Reihenfolgen, die im Modell unter allen Umständen angewendet werden. Die tatsächlich realisierte Steuerung hingegen, die zum Beispiel kurzfristig auf Störfälle in der Wasserstraße oder besondere hydrologische Situationen wie Starkregeneignisse reagiert, wird mit dem Modell nicht abgebildet.
- 3) Die Simulation der Pump- und Entlastungs-(Entwässerungs)-wassermengen erfolgt mit der vorausschauenden genauen Kenntnis über alle Wasservolumenströme im Zeitschritt. Das entspricht nicht genau der Praxis, bildet die mittleren Verhältnisse jedoch annähernd gut ab.
- 4) Grundsätzlich gilt für jede Modellierung: Das Modell kann nur so gut sein wie seine Prozessbeschreibungen (Parametrisierungen) und Eingangsgrößen (Anfangsbedingungen, Randbedingungen). Diese sind jedoch immer mit Ungewissheiten verbunden, da ein Modell eine (mehr oder weniger stark) vereinfachte bzw. stark abstrahierte Abbildung der Realität bleiben muss (siehe MAURER 2017, s. S. 84ff.).

## 6 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Kanal- und Flusstauhaltungen (insbesondere das System von Rhein bis Oder) stellen ein eng vernetztes wasserwirtschaftliches System dar, in dem lokale Maßnahmen der Wasserbewirtschaftung sich stets auch regional und sogar überregional auswirken können. Vor diesem Hintergrund bietet die modellgestützte Abbildung der Wasserbewirtschaftung einen Mehrwert und erhöht zugleich das System- und Prozessverständnis.

Die unabdingbare Grundlage der Modellierung sind Daten. Neben den Daten, die das System und seine Schnittstellen zur Umgebung beschreiben, sind dies bei bewirtschafteten Systemen insbesondere die Daten zur Steuerung und zur Wassernutzung, wobei letztere nur bedingt von den natürlichen Verhältnissen abhängen, sondern eher von den sozio-ökonomischen Interessen der Nutzer.

(Wasser-)Nutzungsdaten stellen einen Schlüssel zum Prozessverständnis des Systems dar. Die Analyse und Plausibilisierung dieser Daten sollte daher sorgfältig und akribisch unter Einbeziehung des Erfahrungsschatzes des Bewirtschafters erfolgen. Dies erfordert in der Regel einen hohen iterativen Kommunikations- und Abstimmungsaufwand. Derart qualitätsgesicherte Daten (sowie die Rohdaten) sollten in einer zentralen Datenhaltung nachhaltig aufbewahrt und jedem (soweit aus rechtlichen Gründen möglich) zugänglich gemacht werden.

Durch die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung ist es für ihre fachliche Beratung gelungen, an der Bundesanstalt für Gewässerkunde ein Modellinstrumentarium erfolgreich zu etablieren, welches schnell einsatzbereit ist. Entsprechend konnte der Aufbau und die Weiterentwicklung der Modelle zur Simulation der Wassermengenbewirtschaftung an Kanal- und Flusstauhaltungen an vielen anwendungsbezogenen Problemstellungen gezeigt werden.

## Literatur

- BODENSEH, M. (2017): Amtliche Wasserstatistik – Ergebnisse und Methoden. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 51-56
- BRUDY-ZIPPELIUS, T. (2003): Wassermengenbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Ruhr: Simulation und Echtzeitbetrieb, Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe
- DÖLL, C. (2010): Entwicklung der transdisziplinären Methode „Akteursbasierte Modellierung“ und ihre Anwendung im Problemfeld der mobilen, organischen Fremdstoffe : die Verknüpfung von Akteurswahrnehmungen, partizipativer Szenarienentwicklung und sequentieller Modellierung von Handlungsentscheidungen. Dissertation am Fachbereich der Geowissenschaften und Geographie der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D. (2017): Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals – Herausforderungen und Lösungsansätze. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 114-129
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D., J. HOHENRAINER, K. RICHTER, R. OPPERMAN, S. KRAUSE (2011): BEWASYS Rhein-Oder – Tageswertmodell zur Simulation der Wasserbewirtschaftung der Bundeswasserstraßen zwischen Rhein und Oder. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1730
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D., K. RICHTER (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Bewirtschaftung des westdeutschen Kanalsystems. Bericht im Auftrag des WSA Duisburg-Meiderich, Bundesanstalt für Gewässerkunde, in Bearbeitung
- HOHENRAINER, J., A.-D. EBNER VON ESCHENBACH (2016): Untersuchungen zu den Auswirkungen zusätzlicher Wasserentnahmen für die Feldberegnung aus dem Elbe-Seitenkanal und der Scheitelhaltung des Mittellandkanals - Vollständige Fassung, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1898

- MAURER, T. (2017): Modellierung – Die Kunst bestmöglicher Interpolation zwischen und Extrapolation von Messdaten und Szenarien. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 84-92
- MAUSER, W., M. PRASCH, R. WEIDINGER, S. STÖBER (Hrsg) (2016): Regional assessment of global change impacts. Springer Vieweg Verlag
- RICHTER, K. (2017): Szenarien zur Wassernutzung – projektspezifische Erfahrungen und Erkenntnisse. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 57-67
- ROTH, H. (2017): Datenbanksystem für Wassernutzungsdaten ÜWA (Infosystem Überregionale Wasserbewirtschaftung). In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 13./14. September 2016 in Koblenz. – Veranstaltungen 5/2017, S. 44-50

**Kontakt:**

**Dr.-Ing. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach**

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261/ 1306 5187

E-Mail: [EbnerVonEschenbach@bafg.de](mailto:EbnerVonEschenbach@bafg.de)

# Ermittlung einer Bewirtschaftungsstrategie für den Mittellandkanal-West bei starkem Westwind

Peter Schmitt-Heiderich und Fabian Belzner

## 1 Einleitung

Der Mittellandkanal (MLK) ist die längste künstliche Binnenwasserstraße in Deutschland und wesentlich für den Verkehr zwischen Hamburger Hafen, Rhein und den ostdeutschen Wasserstraßen. Die 174 km lange Westhaltung verläuft in West-Ost-Richtung, so dass starke Westwinde eine Schrägstellung des Wasserspiegels erzeugen, die die Schifffahrt behindern können. Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Minden beauftragt worden, eine Bewirtschaftungsstrategie zur Einhaltung der Grenzwasserstände bei starkem Westwind abzuleiten (BAW 2015).

Zunächst wurden kontinuierliche Aufzeichnungen von Wind- und Wasserständen über einen Zeitraum von 15 Jahren analysiert. Zahlreiche historische Westwindereignisse wurden identifiziert und aufbereitet, die die Reaktion des Mittellandkanals auf die Windbelastung zeigen. Aus den Windaufzeichnungen wurden Bemessungswinde unterschiedlicher Jährlichkeiten und Dauern abgeleitet, für die nachzuweisen war, dass die vorhandenen Grenzwasserstände eingehalten werden.

Da die verfügbaren eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Strömungsmodelle (1D-HN-Modelle) der BAW den Windeinfluss nicht berücksichtigen, wurden die Saint-Venant'schen Strömungsgleichungen um den Windkraftterm erweitert und mit dem Preissmann-Box-Schema diskretisiert.

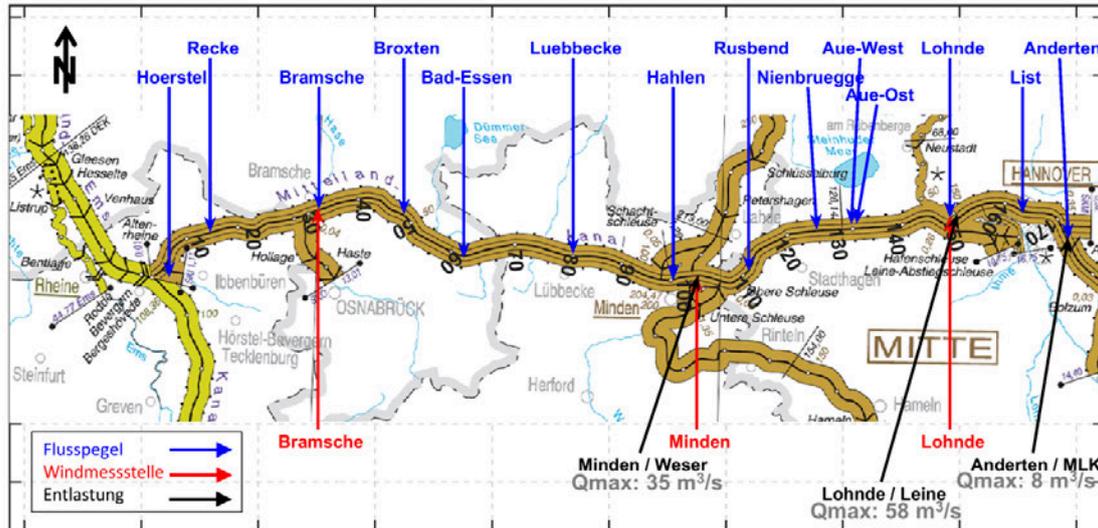
## 2 Randbedingungen und Messwerte

### 2.1 Randbedingungen

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der Wind- und Wasserstandsmessstellen am MLK-West. Die drei Windmessstellen sind rot und die 14 Wasserstandsmessstellen blau eingetragen. Die Kontrollbauwerke entlasten bei Minden in die Weser und bei Lohnde in die Leine. Bei Anderten kann überschüssiges Wasser in die Scheitelhaltung des Mittellandkanals gepumpt werden. Die maximalen Kapazitäten sind in Abb. 1 eingetragen. Die Stationierungen des MLK-West sind im Abstand von 10 km ausgewiesen.

Der Normalwasserstand (NWST) im MLK-West wurde 1978 zu 50,30 m+NN festgelegt mit einem bis auf 30 cm linear ansteigenden Zuschlag für Hochwasseraufleitung, Windstau,

Schwall und Sunk zwischen MLK-km 152 und MLK-km 167. Diese Festlegung der Normalwasserstände hat bis heute Bestand. Es existieren keine oberen und unteren Betriebswasserstände  $BW_O$ ,  $BW_U$  und keine Grenzwasserstände  $GW_O$  und  $GW_U$ , die kurzzeitige Wasserpiegelschwankungen aus Schwall und Sunk berücksichtigen [ $BW_U - dyn.z$ ,  $BW_O + dyn.z$ ].



**Abb. 1:** Lageplan mit den Messstellen, den Entlastungen und deren Entlastungskapazitäten

Das 1D-HN Modell (Kapitel 3) benötigt einen Anfangszustand sowie die Randbedingungen am westlichen und östlichen Ende des MLK. Der Anfangszustand  $H(x,t=0)$  kann für das Nachrechnen gemessener Ereignisse aus den gemessenen Wasserständen gut rekonstruiert werden mit der Annahme, dass der stationäre Anfangsabfluss  $Q(x,t=0) = 0 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt.

Der Abfluss am östlichen Ende des MLK ist durch den Pumpbetrieb in Anderten bekannt. Am westlichen Ende mündet der MLK-West in die Haltung Münster-Bergeshövede des Dortmund-Ems-Kanals (DEK). Damit stellt sich bei Westwind ein Zufluss aus dem DEK ein, der von den Wasserstandsdifferenzen und dem verfügbaren Wasservolumen abhängig ist. Die DEK-Haltung hat ca. 2 Mio.  $\text{m}^2$  freie Wasseroberfläche. Damit ergeben sich 200.000  $\text{m}^3$  Wasser bei einer Absenkung um 0,1 m. Ein zusätzlicher Zufluss in den DEK aus der DEK-Scheitelhaltung wurde mit  $[0; 2; 4; 6] \text{ m}^3/\text{s}$  variiert.

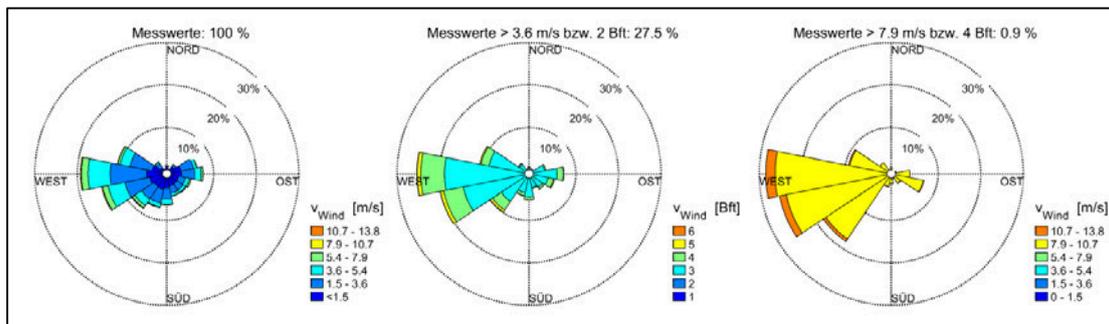
## 2.2 Messwerte

Die Wasserstände, Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen wurden für den Zeitraum Januar 1998 bis August 2012 ausgewertet. Die Originalwerte liegen als Mittelwerte über 15 Minuten vor. Die aufgezeichneten maximalen Windgeschwindigkeiten betragen für Bramsche 16 m/s und entsprechen damit einer Windstärke von 7 Bft. Für Minden und Lohnde entsprechen die Maximalwerte der Windstärke 6 Bft.

In Abb. 2 sind für die Messstelle Minden die Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen grafisch in Windrosen klassifiziert. Für die Klassifizierung der Windrichtungen wurden die Messwerte in Segmente mit einem Winkel von  $22,5^\circ$  eingeteilt. Die prozentualen Häufigkeiten sind als konzentrische Kreise aufgetragen. Die Schnittpunkte der konzentrischen Kreise mit den Segmenten beschreiben die Häufigkeiten einer Windrichtung. Große Segmente

bedeuten, dass mit einer hohen Wahrscheinlichkeit der Wind aus der dem Segment zugeordneten Richtung weht. Innerhalb eines Segmentes sind die Windgeschwindigkeiten entsprechend der Einteilung der Beaufort-Skala über die Windstärken klassifiziert. Die farbliche Kodierung der Windstärken ist in allen Windrosen gleich gewählt und endet mit 6 Bft, was Windgeschwindigkeiten von 10,7 – 13,8 m/s entspricht.

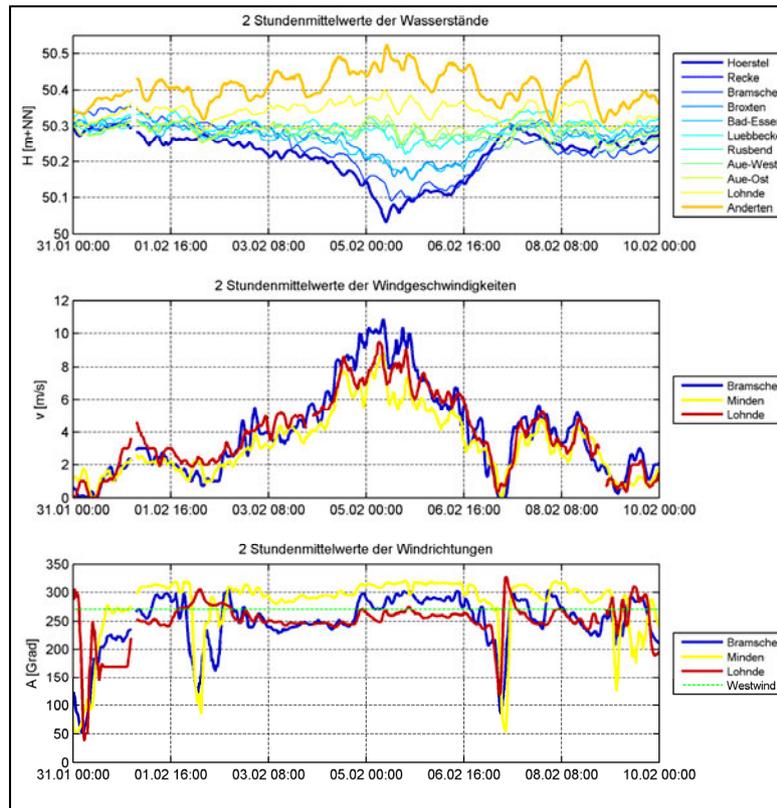
Im linken Diagramm der Abb. 2 sind alle 15 Minutenwerte ausgewertet. Die Windrosen werden dominiert durch die kleinen Windstärken 1 – 3. West- und Südwestwinde treten am häufigsten auf, Nordwinde kaum. Im mittleren Diagramm sind nur Windstärken > 2 Bft dargestellt. Die dort aufgetragenen Häufigkeiten in den Windrosen entsprechen der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass die Windgeschwindigkeit größer als 3,6 m/s ist. Bei der Messstation Minden erfüllen noch 27,5 % der Messwertepaare diese Bedingung. In der letzten Spalte sind nur Windstärken > 4 Bft dargestellt, die die Dominanz der westlichen und südwestlichen Windrichtungen bei den höheren, selten auftretenden Windgeschwindigkeiten belegen. Die Messungen in Bramsche und Lohnde zeigen ein vergleichbares Verhalten.



**Abb. 2:** Windrosen der Messstelle in Minden für alle Messwerte und Messwerte > 2 bzw. 4 Bft

Aus den vorhandenen Messdaten wurden 26 Windereignisse ausgewählt und analysiert. Als Beispiel sind in Abb. 3 die aufbereiteten 2-h-Mittelwerte der Wasserstände, Windgeschwindigkeiten und -richtung für den Zeitraum 31.01.1999 bis 10.02.1999 dargestellt. Es hatte sich eine stabile Westwindlage ausgebildet, die Wasserstandsunterschiede folgten dem Verlauf der Windgeschwindigkeiten zeitlich versetzt. Die Wasserstände im Osten stiegen nicht über den NWST an, da größere Wassermengen in die Leine entlastet wurden ( $> 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dafür fielen die Wasserstände im Westen unter 50,10 m+NN (vgl. auch Kapitel 4). Die dazugehörigen Tageswerte der Entlastungswassermengen wurden durch die BfG bilanziert und bereitgestellt.

Die Analyse der 26 Windereignisse zeigte, dass die Schrägstellungen in den Wasserspiegellagen nahezu perfekt mit der Stärke der Westwinde korrelieren. Bei kräftigen Westwinden zeigen die drei Windmessstellen Bramsche, Lohnde und Minden ein bezüglich Intensität und Richtung vergleichbares Verhalten, d. h. diese Windsituationen sind großräumig ausgeprägt. Dies ermöglicht die Ableitung von Bemessungswindungen auf der Basis der zwischen den Stationen gemittelten Windgeschwindigkeiten und -richtungen. Die mittleren Werte können für den gesamten MLK-West angesetzt werden. Eine Aufteilung in Bemessungswinde für verschiedene Kanalabschnitte ist somit nicht notwendig (BAW 2015). Aus den Jahreshöchstwerten wurden die Windgeschwindigkeiten der Westwinde für Jährlichkeiten von  $T = 2$  [a] und  $T = 5$  [a] abgeleitet. Ausgewählte Größen der Bemessungswindungen sind in Tabelle 1 aufgelistet.



**Abb. 3:** 2-h-Mittelwerte der Wasserstände, Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen vom 31.01.1999 bis 10.02.1999

**Tabelle 1**

Bemessungswindgeschwindigkeiten  $v$  [m/s] für den MLK-West (Westwind)

Dauer [h]	6	12	18	24	36	48	60	72
T = 2 [a]	8,8	8,0	7,6	7,2	6,8	6,3	6,1	5,7
T = 5 [a]	10,2	9,4	8,6	8,0	7,5	7,0	6,7	6,5

### 3 Modell und Kalibrierung

#### 3.1 Modellgleichungen

Die eindimensionale mathematische Beschreibung des Abflusses in Freispiegelgerinnen erfolgt mit den Saint-Venant'schen Strömungsgleichungen. Es handelt sich dabei um Erhaltungsgleichungen, welche Massen- und Impulserhalt beschreiben. Die Herleitung und die Lösung des Saint-Venant'schen Gleichungssystems sind Stand der Technik und in zahlreichen Büchern beschrieben (z. B. CUNGE et al. 1980). Am Markt etablierte 1D-Strömungslöser berücksichtigen den Windeinfluss in der Regel nicht, so dass die Saint-Venant'schen Strömungsgleichungen um einen Windkraftterm erweitert wurden. Dieser Windkraftterm  $F_W$  berücksichtigt die Windschubspannung  $\tau_w$  an der Wasseroberfläche ( $b \cdot dx$ ), die quadratisch von der resultierenden Geschwindigkeit  $v_R$  an der Grenzfläche zwischen dem Fluid und der Umgebungsluft abhängt. Der Windschubkoeffizient  $c_f$  skaliert die Schubspannung linear (Gl. 1):

$$F_w = \tau_w \cdot b \cdot dx \quad (1)$$

$$\text{mit } \tau_w = \frac{-\rho_{Luft} \cdot c_f \cdot |v_r| \cdot v_r}{2} \quad \text{und} \quad v_r = v_{Wasser} - v_{wind} \cdot \cos\alpha$$

Die Kontinuitätsgleichung (Gl. 2) bleibt unbeeinflusst durch den Windkraftterm, dieser wird in der Erhaltungsgleichung für den Impuls (Gl. 3) berücksichtigt.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{lokale Beschleunigung}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right)}_{\text{konvektive Beschleunigung}} + g \cdot A \cdot \left( \underbrace{\frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{Druck}} - \underbrace{I_0}_{\text{Sohlgefälle}} + \underbrace{I_R}_{\text{Reibung}} \right) + \underbrace{\frac{\rho_{Luft}}{\rho_{Wasser}} \cdot c_f \cdot |v_r| \cdot v_r}_{\text{Wind}} \cdot b = 0 \quad (3)$$

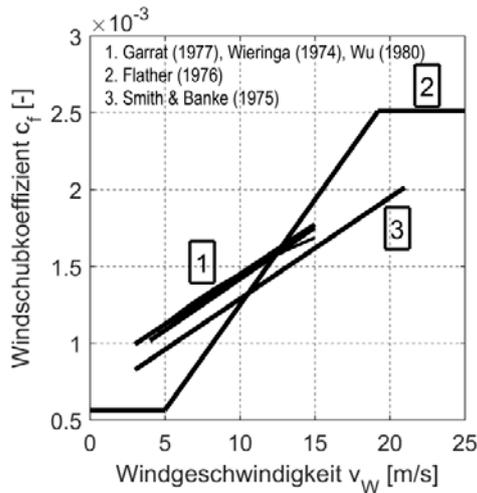
Die numerische Lösung des Gleichungssystems erfolgt implizit mit dem Preissmann-Box-Schema. Das Gleichungssystem sowie die numerische Lösung sind ausführlich von BELZNER & SCMITT-HEIDERICH (2014) beschrieben.

Für die Zuflussrandbedingung des MLK-West zum DEK wurde das HN-Modell um eine Speichergleichung für den DEK erweitert. Der Wasserstand im DEK entspricht dabei dem Wasserstand am westlichen Knoten des MLK-West. Dabei wird der Zufluss pro Zeitschritt aus der Wasserstandsänderung im DEK ermittelt. Die aus der Numerik resultierenden hochfrequenten Zuflussschwankungen werden mit einem nachgeschalteten Tiefpass (PT1-Glied) gedämpft, der hier auch als linearer Einzelspeicher interpretiert werden kann, der das Fließverhalten zwischen DEK und MLK charakterisiert (BAW 2015).

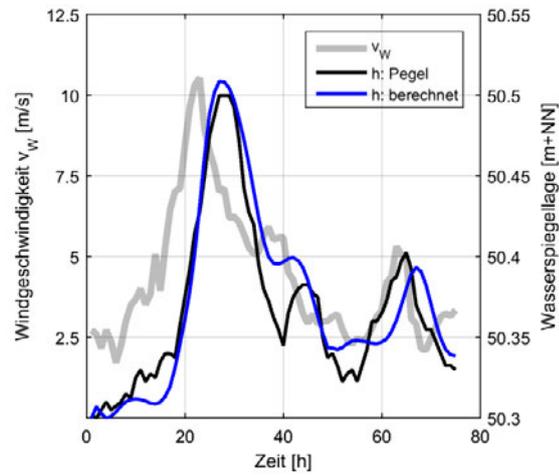
### 3.2 Modellerstellung und Kalibrierung

Für die Lösung der Saint-Venant'schen Gleichungen wurden Querprofile im Abstand von 100 m erstellt. Damit ergeben sich für die 174 km lange Westhaltung des MLK 1.740 Querprofile, die aus vorhandenen Sohlpeilungen und einem Abgleich der Uferanschlüsse mit den möglichen Regelprofilen konstruiert wurden.

In der Literatur finden sich zahlreiche sehr unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung des Windschubkoeffizienten  $c_f$ , die sich i. d. R. auf die Parametrisierung von sehr großen überströmten Wasserflächen wie z. B. Ästuaren beziehen. Allein WAGNER (1969) beschreibt 39 verschiedene Ansätze. MALCHEREK (2010) stellt fünf weitere Ansätze vor, bei denen der Windschubkoeffizient mit zunehmender Windstärke steigt (Abb. 4). Für den MLK wurde der Windschubkoeffizient  $c_f$  durch Nachrechnen von sieben historischen Windereignissen mit  $0,5 \cdot 10^{-3} < c_f < 2,5 \cdot 10^{-3}$  bestimmt. Die beste Anpassung des Modells an die historischen Windereignisse ergab sich mit einem Windschubkoeffizienten von  $c_f = 1,6 \cdot 10^{-3}$  (Abb. 5). Eine Abhängigkeit des Koeffizienten von der Windgeschwindigkeit konnte nicht beobachtet werden.



**Abb. 4:** Literaturansätze für die Bestimmung des Windschubkoeffizienten (nach MALCHAREK 2010)

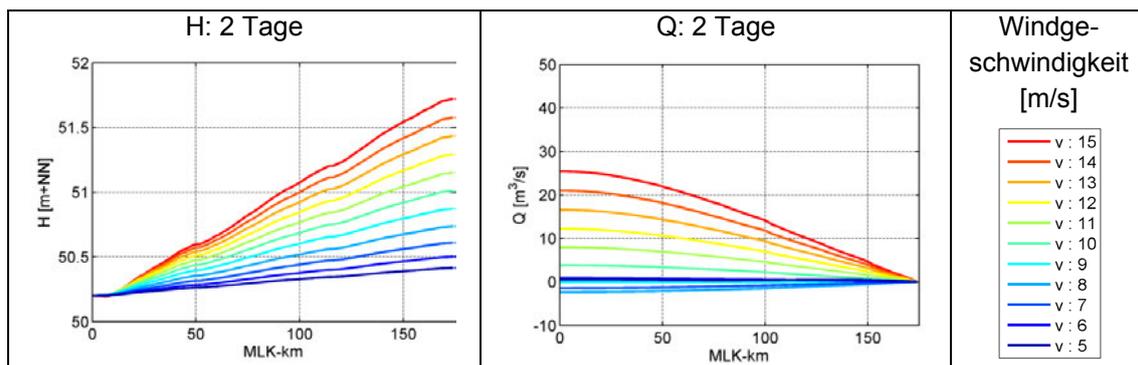


**Abb. 5:** Kalibrierung des Windschubkoeffizienten am Beispiel starker Westwinde im Februar 2010

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Systematische Untersuchungen

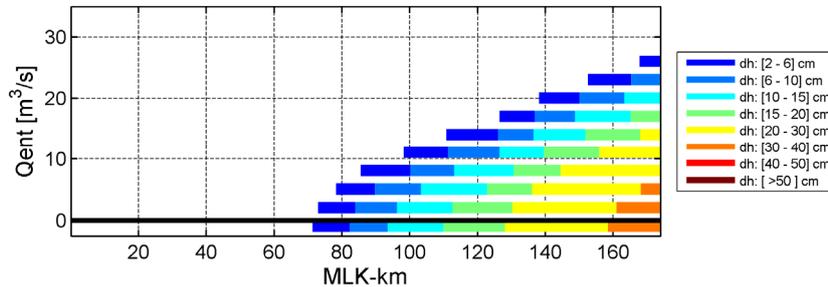
Die Schrägstellung des Wasserspiegels wurde systematisch für Windgeschwindigkeiten zwischen 5 m/s und 17 m/s untersucht. Die simulierte Zeit betrug jeweils 3 Tage, an denen der Wind konstant auf den MLK-West wirkte. Für jede Variante wurden zahlreiche Vergleichsrechnungen ohne Entlastung und mit Entlastungen in Anderten, Lohnde und Minden sowie gemeinsamen Entlastungen untersucht. Die Randbedingung zum DEK wurde als Wasserstandsrand mit  $H = 50,20 \text{ m+NN}$  formuliert.



**Abb. 6:** Ausgangszustände der Wasserstände und Abflüsse infolge unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten nach 2 Tagen (ohne Entlastungen)

Die Wasserstände  $H$  und Abflüsse  $Q$  sind für 10 verschiedene Windgeschwindigkeiten in Abb. 6 dargestellt, wie sie sich nach 2 Tagen ohne Entlastungen errechnen (Ausgangsvarianten). Bei Windgeschwindigkeiten  $< 9 \text{ m/s}$  stellen sich in weniger als 2 Tagen stationäre Zustände ein. Die Umlagerung des Wassers ist beendet, d. h. die Abflüsse tendieren gegen Null. Für die höheren Windgeschwindigkeiten ( $> 9 \text{ m/s}$ ) dauert diese Umlagerung länger an.

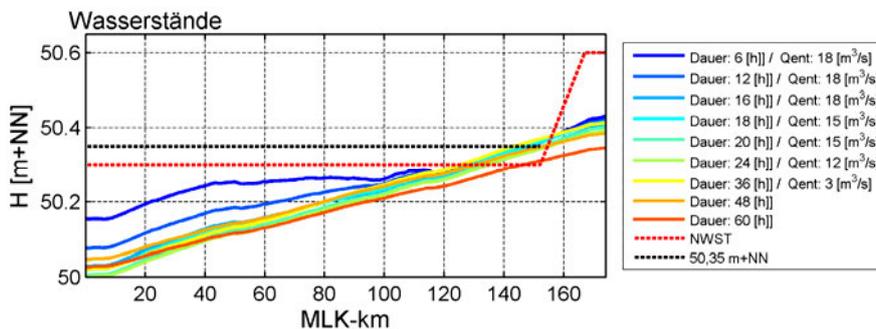
Zur Sicherstellung der Schifffahrt dürfen kritische Wasserstände nicht überschritten werden, da ansonsten Brückenanfahrten zu befürchten sind. Die Wasserstände können durch Entlastungen in Minden, Lohnde und Anderten abgesenkt werden. Dies wird in Abb. 7 anhand der Entlastung in die Weser bei Minden erläutert. Der kritische Höchstwasserstand ist hier zu 50,40 m+NN angenommen. Die Ausgangslage ist in diesem Bild unter der hervorgehobenen Nulllinie aufgetragen. Die Differenzen der berechneten Wasserspiegel zu 50,40 m+NN sind in Klassen entsprechend der Legende unterteilt. Die Streckenauftragung (x-Achse) der klassifizierten Überschreitungshöhen eines kritischen Wasserstandes verdeutlicht die Wirkungen der Entlastungen bezüglich der Einhaltung eines kritischen Höchstwasserstandes. Die Abbildung zeigt beispielsweise, dass bei einer stabilen Westwindlage mit einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s durch eine Entlastung von 27 m<sup>3</sup>/s bei Minden der Windstau am Ostende der Westhaltung auf 6 cm begrenzt werden kann.



**Abb. 7:** Überschreitung eines Wasserstandes von 50,40 m+NN infolge Entlastung in Minden bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s nach 2 Tagen

#### 4.2 Bemessungswinde mit T = 2 [a]

Für Bemessungswinde mit T = 2 [a] sind in Abb. 8 die Wasserstände aufgetragen, die 50,35 m+NN bzw. den NWST im Stadtgebiet von Hannover (> MLK-km 152) nicht überschreiten. Die zugehörigen Entlastungsmengen in die Leine sind in der Legende dokumentiert, die entlastete Wassermenge in die Weser wurde für alle Winddauern mit 8 m<sup>3</sup>/s angesetzt. Der DEK wurde berücksichtigt, erhielt aber keinen zusätzlichen Zufluss (worst-case).



**Abb. 8:** Wasserstände bei Entlastung in die Leine (siehe Legende) und Weser (8 m<sup>3</sup>/s) für Bemessungswinde mit T = 2 [a]

Die entlastete Wassermenge in die Leine sinkt mit zunehmender Ereignisdauer von 18 m<sup>3</sup>/s auf 0 m<sup>3</sup>/s. Infolge der Entlastungen in Weser und Leine werden die Grenzwasserstände im Osten eingehalten, allerdings sinkt der Wasserstand am westlichen Ende auf ca. 50,0 m+NN. Die Berechnungen zeigen, dass pro 1 m<sup>3</sup>/s zusätzlichen Zufluss in den DEK der Wasserstand im Westen um ca. 1 cm angehoben wird.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Windereignisse der Jährlichkeiten  $T = 2$  [a] (und größer) sind am MLK-West technisch beherrschbar. Die Bewirtschaftungsstrategie bei Westwind ist nicht eindeutig definierbar, da im MLK mehrere Bauwerke vorhanden sind, an denen Wasser abgeleitet bzw. gepumpt werden kann. Mit unterschiedlichen Kombinationen der Beaufschlagung der Bauwerke wird die Vorgabe erfüllt, dass der Normalwasserstand im MLK eingehalten wird.

Trotz bestehender Unsicherheiten in der Modellbildung, der Parametrisierung des Windschubterms sowie der Statistik der Bemessungswinde wird diese Aussage als gültig erachtet, da die vorhandenen Unsicherheiten geringer sind als die Systemreserven der Entlastungsbauwerke.

## Literatur

- BAW - Bundesanstalt für Wasserbau (2015): Prüfung der Normalwasserstände in der Westhaltung des Mittellandkanals (MLK-West) unter Windbelastung. Auftraggeber: WSA Minden, Auftrags-Nr.: A393 303 10157, Bearbeiter: Schmitt-Heiderich, P. und Belzner, F., unveröffentlicht
- CUNGE J. A., F. M. HOLLY, A. VERWEY (1980): Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman Publishing Limited, London
- BELZNER, F., P. SCHMITT-HEIDERICH (2014): Ein anwendungsorientiertes Modell zur Bestimmung der Windreibungseinflüsse am Beispiel des Mittellandkanals, 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014, Technische Universität Dresden, Fakultät für Bauingenieurwesen, S. 449 – 458
- MALCHEREK, A. (2010): Gezeiten und Wellen: Die Hydromechanik der Küstengewässer. Vieweg, Wiesbaden
- WAGNER, H. (1969): Die Bestimmung der an der Wasseroberfläche angreifenden Windschubspannungen. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin - Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, Heft 24

### Kontakt:

**Dr.-Ing. Peter Schmitt-Heiderich**

**Fabian Belzner M.Eng.**

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstr. 17

76187 Karlsruhe

Tel.: 0721/ 9266 2600

E-Mail: peter.schmitt-heiderich@baw.de

# Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals – Herausforderungen und Lösungsansätze

Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach

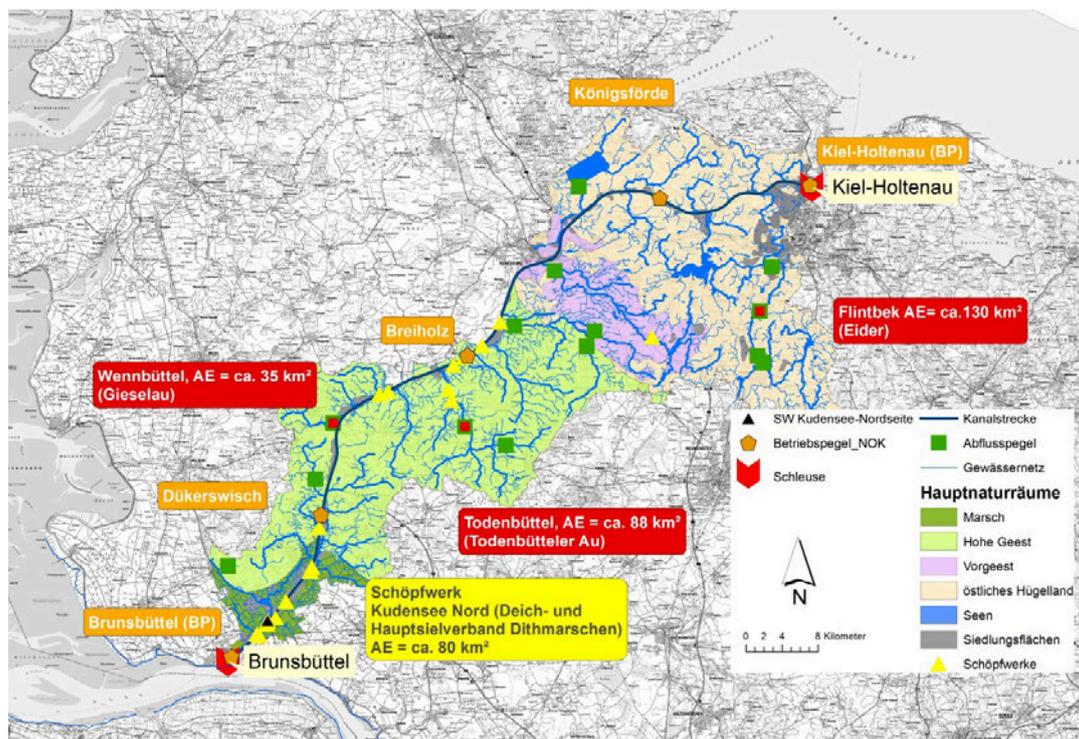
## 1 Untersuchungsgegenstand und -gebiet

Der Nord-Ostsee-Kanal (NOK) verbindet als Bundeswasserstraße mit einer Länge von ca. 100 km die Nordsee über die Unterelbe bei Brunsbüttel mit der Ostsee über die Kieler Förde. Er durchquert im Westen die bis zu 3 m tiefer liegende Marsch, durchschneidet den bis zu 25 m hohen Geestrücken, folgt der Eiderniederung und erreicht das östliche holsteinische Hügelland, um dann bei Kiel-Holtenau in die Kieler Förde zu münden. Die Lage der Hauptnaturräume sowie der Schleusenanlagen zeigt Abb. 1. Der NOK ist die meist befahrene künstliche Wasserstraße der Welt. Er ist sowohl wichtiger Teil der regionalen Wirtschaftsstruktur als auch ein wesentlicher Baustein des transeuropäischen Verkehrsnetzes.

Neben seiner Hauptfunktion als Wasserschiffahrtsstraße dient der NOK der Entwässerung des umgebenen Gebietes. Er wird von zahlreichen natürlichen Zuflüssen aus einem Einzugsgebiet von 1.530 km<sup>2</sup> gespeist, wobei das tiefer liegende Gebiet mit einer Fläche von 250 km<sup>2</sup> mit Hilfe von Schöpfwerken entwässert wird. Der NOK ist damit der größte künstliche Vorfluter Schleswig-Holsteins und entwässert eine Fläche von 10 % des Landes. Die Schöpfwerke befinden sich (wie Abb. 1 zeigt) schwerpunktmäßig in den Bereichen von Marsch und Hoher Geest. Der größte Teil des Untersuchungsgebietes befindet sich südlich des Kanals.

Die Bewirtschaftung des NOK erfolgt auf einen Wasserstand, der möglichst konstant auf mittlerem Meeresniveau gehalten wird. Diese Steuerung ist notwendig, um einen möglichst reibungslosen Ablauf des Schiffsverkehrs, den Betrieb der Wasserstraße einschließlich des Querverkehrs durch die Fahren und die Standsicherheit der Böschungen und Bauwerke zu gewährleisten.

Die Regulierung des (Kanal-)Wasserstandes erfolgt im Regelfall (d. h. Wasserstände bis 5,25 m PN (Pegelnulppunkt)) durch Entwässerungsschütze der kleinen Schleuse in Brunsbüttel und/oder über das Entwässerungssiel in Kiel-Holtenau. Einzige Randbedingung dabei ist, dass die Außenwasserstände niedriger sind als die Kanalwasserstände, denn eine Entwässerung ist nur im Freigefälle möglich.



**Abb. 1:** Einzugsgebiet des Nord-Ostsee-Kanals. Ein Großteil des 1.530 km<sup>2</sup> großen Gebietes befindet sich südlich des Kanals. Zusätzlich zu den Hauptnaturräumen sind die Schleusen- und einzigen Entwässerungsstandorte in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau, schwerpunktmäßig die Lage der Schöpfwerke in Marsch und Hohe Geest sowie die Betriebs- und Abflusspegel dargestellt. Die Fläche des messtechnischen erfassten Einzugsgebiets (bezogen auf den Abfluss) beträgt ca. 600 km<sup>2</sup> und damit ca. 40 %. Auf die drei hervorgehobenen Abflusspegel (Wennbüttel, Todenbüttel und Flintbek) und auf die Wasserstandsdaten im Kanal auf Höhe des Schöpfwerkes in Kudensee Nord wird im weiteren Text explizit eingegangen. Die Darstellung erfolgte durch die BfG auf der Grundlage von Daten der Landesämter für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume sowie Natur und Umwelt Schleswig-Holsteins und in der BfG verfügbarer WMS-Dienste.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurde von der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) (Standort Kiel) beauftragt, Indikatoren für Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOK anhand tatsächlich abgelaufener Ereignisse abzuleiten und die Häufigkeit ihres Auftretens unter Berücksichtigung möglicher zukünftiger klimatischer Änderungen und veränderten betrieblichen Erfordernissen der Wasserstraße zu ermitteln. Das Vorgehen kann in drei Schritte gegliedert werden:

1. In einem ersten Schritt wurden **tatsächlich abgelaufene kritische Situationen** anhand der Wasserstandsaufzeichnungen der fünf Betriebspegel (siehe orange Fünfecke in Abb. 1) identifiziert und deren ursächliche Randbedingungen (Höhe des Gebietszuflusses, Höhe der Außenwasserstände, Windrichtung- und Windgeschwindigkeit) versucht zu ermitteln. Die Höhe des täglichen bzw. stündlichen kontinuierlichen Gebietszuflusses in den Kanal wurde dabei anhand von Abflussbeobachtung abgeschätzt. Details hierzu sind in Abschnitt 2.2 zu finden.

2. In einem zweiten Schritt wurde ein Wasserhaushaltsmodell LARSIM NOK (basierend auf dem Modellsystem LARSIM, Bremicker 2000) für die Simulation des zukünftigen Gebietszuflusses aus dem 1.530 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet bei sich verändernder Meteorologie aufgebaut. Das Wasserhaushaltsmodell wurde als Rastermodell mit einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km<sup>2</sup> aufgebaut und simuliert den Zufluss des Gesamtgebietes im Tageszeitschritt und für ausgewählte westliche Teilgebiete zusätzlich im Stundenzeitschritt (Details hierzu im Abschnitt 3). Der Simulationszeitraum umfasst die 14 hydrologischen Jahre von 1999 bis 2012. Eingangsdaten sind tägliche bzw. stündliche nach Richter (1995) korrigierte Rasterniederschläge, die nach dem REGNIE-Verfahren (DWD 2013) von der Station auf die Fläche übertragen wurden. Für die Ermittlung der Verdunstung nach Penman-Monteith (DVWK 1996) wurden zusätzlich die meteorologischen Größen Lufttemperatur, Globalstrahlung/Sonnenscheindauer, Luftdruck, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit benötigt. Kalibrierung erfolgte für die Zeitspanne von November 2001 bis Oktober 2010. Das Modell wurde an den kalibrierten Pegeln für zwei Zeiträume validiert (November 1998 bis Oktober 2001; November 2010 bis Oktober 2012). Modellaufbau (inkl. Kalibrierung/Validierung) und -anwendung erfolgten von der Aquantec GmbH im Auftrag der BfG in 2015. Der Abschlussbericht (Aquantec 2015) ist nicht öffentlich verfügbar, jedoch werden insbesondere in Abschnitt 3 Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes vorgestellt.  
Für fachliche Details zum Wasserhaushaltsmodell wird auf den Erläuterungsbericht der BfG zum o. g. Auftrag verwiesen, der zum Abschluss des Projektes erstellt wird und daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht vorliegt. An dieser Stelle wird für das (Lese-)Verständnis nur auf das Grundsätzliche verwiesen.
3. In einem dritten Schritt wurde das **Bilanzmodell BEWASYS NOK** für den eigentlichen Kanal zur Simulation der Entwässerungswassermengen an den Kanalenden aufgebaut, um den geforderten (Ziel-)Wasserstand im Kanal einhalten zu können. Dieses Kanalbilanzmodell basiert auf dem Modellsystem BEWASYS (PREUB 2010) und simuliert im Stundenzeitschritt die Entwässerungswassermengen entsprechend eines vorgegebenen funktionalen Zusammenhanges zwischen Wasserstandsdifferenzen von Binnen- und Außenpegel und der Höhe der Entwässerungsleistung. Die Wasserstände von Nordsee (Untere Elbe, tidebeeinflusst) und Ostsee (Kieler Förde) sind die gemessenen zu Stundenwerten aggregierten Minutenwerte an den Außenpegeln Brunsbüttel (zusammengesetzte Reihe der Pegel Brunsbüttel Mole 1, Brunsbüttel Mole 4 sowie die angepassten Werte des Pegels Cuxhaven) und Kiel-Holtenau über die Zeitspanne der 14 hydrologischen Jahren der Wasserhaushaltsmodellierung. Das Modell BEWASYS NOK wurde von der BfG im Tageszeitschritt parametrisiert und vom Karlsruher Institut für Technologie auf Stundenzeitschritte umgestellt (PREUB 2014). Ebenso wie für das Wasserhaushaltsmodell gilt, dass für fachliche Details auf den Abschlussbericht der BfG zum o. g. Auftrag der GDWS verwiesen wird. An dieser Stelle wird für das (Lese-)Verständnis nur das Grundsätzliche erläutert.  
Eingangsgröße in das Kanalbilanzmodell ist der (abgeschätzte (1) bzw. simulierte (2)) Gebietszufluss. Details hierzu in den Abschnitten 2.2 und 3.

Mit diesem aufgebauten Modellsystem (Schritt (2) und (3)) wird nicht nur die o. g. Fragestellung beantwortet, sondern es kann zudem auch zur Plausibilisierung der verfügbaren Datenbasis bzw. zur Ergänzung fehlender Informationen durch Simulationen herangezogen werden. Daran angeknüpft ist eine Erhöhung des Verständnisses für die wasserwirtschaftlichen Prozesse des Systems.

Diese komprimierte Darstellung zur Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals wird detaillierter untersetzt im Abschlussbericht des o. g. WSV-Auftrages.

## **2 Herausforderungen aufgrund der Datenverfügbarkeit und Lösungsansätze**

### **2.1 Wasserstände im Kanal**

Die verfügbare Datenbasis der Wasserstände zur Identifizierung abgelaufener kritischer Situationen in der Kanalbewirtschaftung im Simulationszeitraum der 14 hydrologischen Jahre von 1999 bis 2012 ist hinsichtlich ihrer zeitlichen Auflösung sehr heterogen: Zeitlich sehr hoch aufgelöste Wasserstandsdaten im Minutenzeitschritt liegen von allen fünf Betriebspegeln (zur Lage siehe orange Fünfecke in Abb. 1) ca. seit Ende 2006/Anfang 2007 vor. Die Zeitspanne davor wird abgedeckt über Tagessterminwerte des Wasserstandes (8 Uhr) an allen Betriebspegeln von 1976 bis Mai 2001 und seit April 2004 von ebenfalls zeitlich hoch aufgelösten Wasserstandsdaten im Kanal auf der Höhe des Schöpfwerkes Kudensee Nord (DHSV Dithmarschen 2016). Für die Zeitspanne Juni 2001 bis März 2004 liegen (gegenwärtig) noch keine Wasserstandsdaten vom Kanal vor. Die Tagessterminwerte (8 Uhr) bis Mai 2001 sind aufgrund der zeitlichen Auflösung nur bedingt geeignet, um kritische Situationen in der Kanalbewirtschaftung zu identifizieren.

Die beobachteten Wasserstände an den Betriebspegeln sind beeinflusst durch Windstau, reflektierte Wellen als Folge der Entwässerungsvorgänge in Brunsbüttel bzw. Kiel-Holtenau und durch die Wellen des Schiffsverkehrs. Nach Aussagen der GDWS können die reflektierten Wellen allein infolge der Entwässerung zu Wasserstandsschwankungen an einem Pegel (im westlichen Bereich von Brunsbüttel bis zur Kanalmitte) von bis zu 30 cm führen. Das bedeutet, dass nicht die Wasserstandszeitreihe eines einzigen Pegels als Referenz (zur Identifikation der kritischen Situationen) angesehen werden kann, sondern die Spannweite der gleichzeitig beobachteten Wasserstände an allen o. g. Standorten berücksichtigt werden sollte. In der linken Abb. 2 sind daher die Spannweiten (als Minima bis Maxima) der jeweils zu selben Stunden gemessenen Kanalwasserstände aller Pegel im Simulationszeitraum von Januar 2007 und Januar 2012 dargestellt. Der Grenzwasserstand für die Entwässerung im Sonderfall von 5,40 m PN (entsprechend der Anweisung für die Entwässerung des NOK, WSA Brunsbüttel (2016)) wird dabei als Bezugswasserstand verwendet. In den 14 hydrologischen Jahren, in denen Wasserstandsinformationen im Kanal zur Verfügung stehen, konnten zwei Ereignisse identifiziert werden, an denen der Grenzwasserstand überschritten wurde: Januar 2007 und Januar 2012. Offen ist damit jedoch noch die Frage, ob ähnliche Ereignisse in der Zeitspanne von 1998 bis März 2004 (mit Tagessterminwerten bzw. ohne Wasserstandsinformationen vom Kanal) aufgetreten sind. Um diese Frage beantworten zu können, wurden die ursächlichen Randbedingungen dieser Ereignisse analysiert: Für beide Ereignisse gelten hohe Tideniedrigwasser in der Nordsee (Pegel Brunsbüttel) bedingt durch starke Winde

aus südwestlicher bis westlicher Richtung (Station Büsum). Gleichzeitig lag der Abflussscheitel aus dem Einzugsgebiet bei mehr als  $110 \text{ m}^3/\text{s}$  (siehe hierzu im Vorgriff bereits rechte Abb. 2). Die letztgenannte Einflussgröße wird im folgenden Abschnitt genauer analysiert.

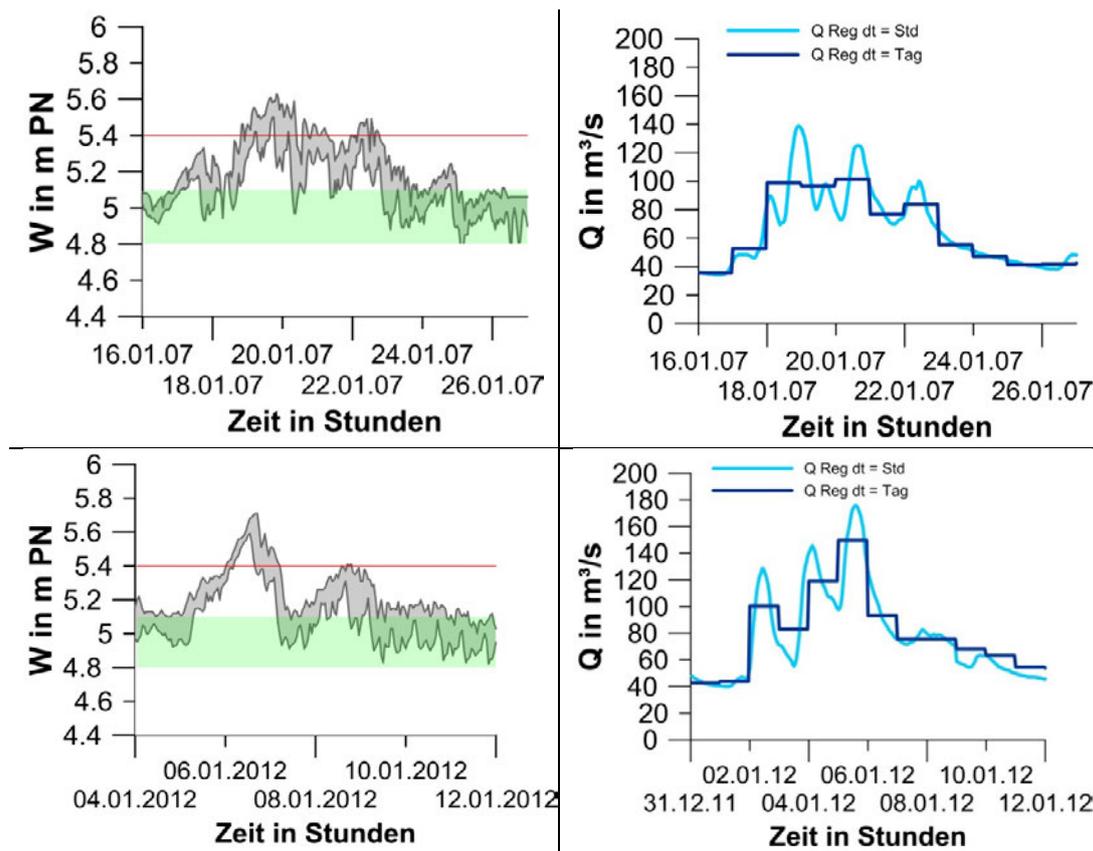
## 2.2 Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet

In Abb. 1 ist die Lage von 14 Abflusspegeln im Einzugsgebiet dargestellt. Stundenwerte des Abflusses liegen seit 1984 vollständig für 5 der 14 Pegel vor. Die übrigen Pegel weisen mehr oder weniger große zeitliche Datenlücken auf. Das Abflussverhalten des Gebietes ist zu 40 % messtechnisch erfasst, für die restlichen 60 % mussten entsprechende Annahmen zum hydrologischen Verhalten (sowohl für die Simulation (siehe Abschnitt 3) als auch für die Regionalisierung) getroffen werden. Erschwerend kommt hinzu, dass ein Großteil der Pegel durch oberhalb liegende zum Teil bewirtschaftete Seen beeinflusst ist. Nur 5 der 14 Pegel können als unbeeinflusste Kopfpegel gelten.

Die erste Abschätzung zur Höhe bzw. zum Volumen des Zuflusses aus dem Einzugsgebiet erfolgte anhand beobachteter täglicher bzw. stündlicher Abflüsse. Unter der Annahme, dass sich das messtechnisch nicht erfasste Gebiet hydrologisch ähnlich verhält wie das messtechnisch erfasste Gebiet wurde eine Regionalisierung über die Größe der Einzugsgebiete der einzelnen Pegel durchgeführt. Dieser Ansatz führt naturgemäß jedoch dazu, dass Zuflussspitzen aus dem oberstrom liegenden Gebiet ohne Berücksichtigung der Effekte von Retention und Translation auf das unterhalb liegende Gebiet übertragen werden, so dass eine Überschätzung der tatsächlichen Hochwasserspitzen (bei extremen, hier jedoch relevanten Ereignissen) denkbar ist. Diese Regionalisierung fand sowohl auf der Ebene der Stundenwerte (hellblaue Farbwahl für die Ganglinien im gesamten Dokument) als auch auf der Ebene der Tageswerte (dunkelblaue Farbwahl für die Ganglinien im gesamten Dokument) statt. In der rechten Abb. 2 sind die abgeschätzten Zuflussganglinien für beide Ereignisse im Januar 2007 und 2012 und in der linken Abb. 2 die entsprechende Spannweite der beobachteten Wasserstände im Kanal dargestellt. Ursache für die hohen Wasserstände im Kanal waren (neben den bereits erwähnten hohen Tideniedrigwasserständen im AP Brunsbüttel) drei sehr kurz nacheinander auftretende Hochwasserwellen mit einem maximalen (abgeschätzten) Hochwasserscheitelwert zu Beginn des Ereignisses in 2007 (am 18.01.2007 von ca. 100 (Tageswert) bis 140 (Stundenwert)  $\text{m}^3/\text{s}$ ) bzw. am Ende des Ereignisses in 2012 (am 05.01.2012 von ca. 150 (Tageswert) bis 170 (Stundenwert)  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Die Wahl des Zeitschrittes der Ausgangszeitreihe (Tages- bzw. Stundenwert) hat naturgemäß Einfluss auf die Höhe des Scheitelabflusses. Unklar ist jedoch zu diesem Zeitpunkt, welche Relevanz diese Unterschiede auf die Simulation der Kanalwasserstände mit dem Kanalbilanzmodell (siehe Abschnitt 4) haben. Festzuhalten ist jedoch, dass der tatsächliche Gesamtzufluss (inkl. der Hochwasserscheitelwerte) zum Kanal unbekannt ist und auch bleibt, und nur mit mehr oder weniger hohen Unsicherheiten abgeschätzt werden kann. Vor diesem Hintergrund ist es umso wichtiger, den Gesamtzufluss über verschiedene Methoden abzuschätzen, um die erzielten Ergebnisse möglichst gut bezüglich ihrer Plausibilität einschätzen zu können.

Gleichwohl wurden die Zuflussganglinien zum Kanal, die über die Regionalisierung abgeschätzt wurden, hinsichtlich der Identifizierung zusätzlicher kritischer Ereignissen (in der Zeitspanne mit fehlenden Wasserstandsdaten bzw. mit Tagesterminwerten) verwendet.



**Abb. 2:** Links: Darstellung der Spannweite stündlicher Wasserstände (als graue Fläche, Differenz von Minima und Maxima) im Kanal im Januar 2007 und Januar 2012. Die Wasserstände in beiden Ereignissen übersteigen die kritische Grenze zur Entwässerung des Kanals von 5,40 m PN (hier dargestellt als rote Linie). Zusätzlich grün dargestellt ist die Höhe der Bewirtschaftungslamelle. Rechts: regionalisierte Gebietszuflüsse auf Stunden- bzw. Tageswertbasis als eine mögliche Ursache (neben den hohen Außenwasserständen, bedingt wiederum durch Wind aus westlicher bzw. südwestlicher Richtung) für die Höhe der Wasserstände im Kanal.

Nur zwei weitere Ereignisse mit Zuflussspitzen über  $175 \text{ m}^3/\text{s}$  (Tageswert) bzw.  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  (Stundenwert) konnten auf diesem Wege identifiziert werden: Februar 2002 (Hochwasserwellen mit maximalen Scheitelabflüssen am 11.02.2002 (ca.  $110$  (Tageswert) und  $170$  (Stundenwert)  $\text{m}^3/\text{s}$ ), 22.02.2002 (ca.  $110$  (Tageswert) und  $150$  (Stundenwert)  $\text{m}^3/\text{s}$ ), 26.02.2002 (ca.  $180$  (Tageswert) und  $210$  (Stundenwert)  $\text{m}^3/\text{s}$ ) und Juli 2002 (19.07.2002:  $180$  (Tageswert) und  $200$  (Stundenwert)  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Das Hochwasserereignis im Februar 2002 enthält für den Pegel Flintbek (Eider) den höchsten gemessenen Hochwasserzufluss (HQ) mit einem Scheitelwert von  $7,84 \text{ m}^3/\text{s}$  (27.02.2002, Zeitspanne von 1985 bis 2011). Das Hochwasserereignis im Juli 2002 enthält für den Pegel Wennbüttel (Gieselau) den höchsten gemessenen Hochwasserzufluss (HQ) mit einem Scheitelwert von  $9,97 \text{ m}^3/\text{s}$  (am 19.07.2002) in der Reihe von 1972 bis 2011. Beide Angaben zum HQ stammen aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch (DGJ 2014).

Es können aus den regionalisierten Zuflussganglinien noch weitere Ereignisse (wie Februar 2004, März 2010, November 2010) mit hohen Zuflussspitzen identifiziert werden, deren Auswirkungen auf die Kanalbewirtschaftung jedoch noch untersucht werden müssen. Hierfür

wird auf den Abschlussbericht zum WSV-Projekt verwiesen. An dieser Stelle erfolgt aufgrund der Datensituation eine detaillierte Befassung mit den Ereignissen Januar 2007 und Januar 2012 sowie ergänzend mit Februar 2002 und Juli 2002.

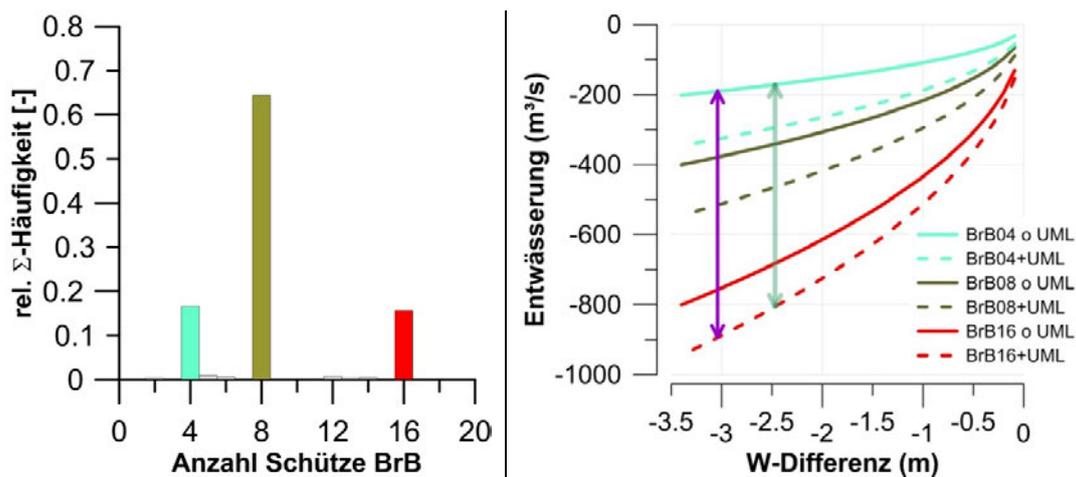
Die Analyse (extremer) Hochwasserereignisse auf der Basis der regionalisierten Gebietszuflüsse in der Zeitspanne der hydrologischen Jahre von 1998 bis 2012 zeigt, dass diese vornehmlich im Winter auftreten. Das wiederum bedeutet, dass das Hauptaugenmerk auf der modelltechnischen Abbildung der Winterabflüsse liegen sollte. Details hierfür in Abschnitt 3.

### **2.3 Entwässerung des Kanals**

Die Entwässerung des Kanals erfolgt bis zu einem Kanalwasserstand von 5,25 m PN über die maximal 16 Schütze der kleinen Schleuse in Brunsbüttel und über das Entwässerungssiel in Kiel-Holtenau, jedoch nur im Freigefälle, wenn der Außenwasserstand geringer als der Kanalwasserstand ist. Steigen die Kanalwasserstände über 5,25 m PN, erfolgt die Entwässerung zusätzlich über die Umläufe der großen Schleuse in Brunsbüttel und über die Umläufe der kleinen Schleuse in Kiel-Holtenau. Da die Entwässerungswassermengen bisher messtechnisch nicht erfasst werden, wurde in einem ersten Schritt anhand von Sekundärdaten wie Entwässerungsdauer, Zahl der geöffneten (maximal 16) Schütze/Sielöffnung, Differenz von Außen- und Binnenwasserstand eine mathematische hydraulische Beziehung zwischen Wasserstandsdifferenz (von Außen- und Binnenpegel) und Entwässerungsleistung erstellt. Die aufgestellte Beziehung wird gegenwärtig messtechnisch validiert. Diese Beziehung findet Eingang in das Bilanzmodell zur Simulation der Entwässerungswassermengen.

Die o. g. Informationen lagen für beide Standorte Brunsbüttel und Kiel-Holtenau von 2010 bis 2012 vor. Über die Zeitspanne davor gibt es keine entsprechenden Informationen, so dass Annahmen für die Vergangenheit (insbesondere für die identifizierten Ereignisse Februar 2002, Juli 2002 und Januar 2007) zu treffen sind.

In einem ersten Schritt wurde daher die Anzahl der Schütze am Standort Brunsbüttel ermittelt, über die schwerpunktmäßig die Entwässerung erfolgt. Das Ergebnis zeigt die relative Summenhäufigkeit in der linken Abb. 3: Zumeist wird entwässert über 8 Schütze (Farbwahl oliv im gesamten Dokument), gefolgt von 4 (Farbwahl hellgrün im gesamten Dokument) bzw. 16 (Farbwahl rot im gesamten Dokument) Schützen. In der rechten Abb. 3 sind die Entwässerungsleistungen bei bestehenden Wasserstandsdifferenzen von Außen- und Binnenpegel (mit und ohne Umläufe der großen Schleuse) dargestellt. Das mittlere Tideniedrigwasser in Brunsbüttel Mole 4 in der Zeitspanne der Abflussjahre von 1998 bis 2010 liegt bei 2,53 m PN. Die Entwässerungsleistung differiert von 200 bis 800 m<sup>3</sup>/s. Das niedrigste Tideniedrigwasser in dieser Zeitspanne lag bei 1,96 m PN. Die Entwässerungsleistung differiert von 200 bis 900 m<sup>3</sup>/s. Beide Spannweiten werden in der rechten Abb. 3 über Pfeile sichtbar gemacht. Für Kiel-Holtenau ergibt sich beim mittleren Niedrigwasser von 3,81 m PN (1998 bis 2010) eine Entwässerungsleistung über das Siel von ca. 170 m<sup>3</sup>/s.



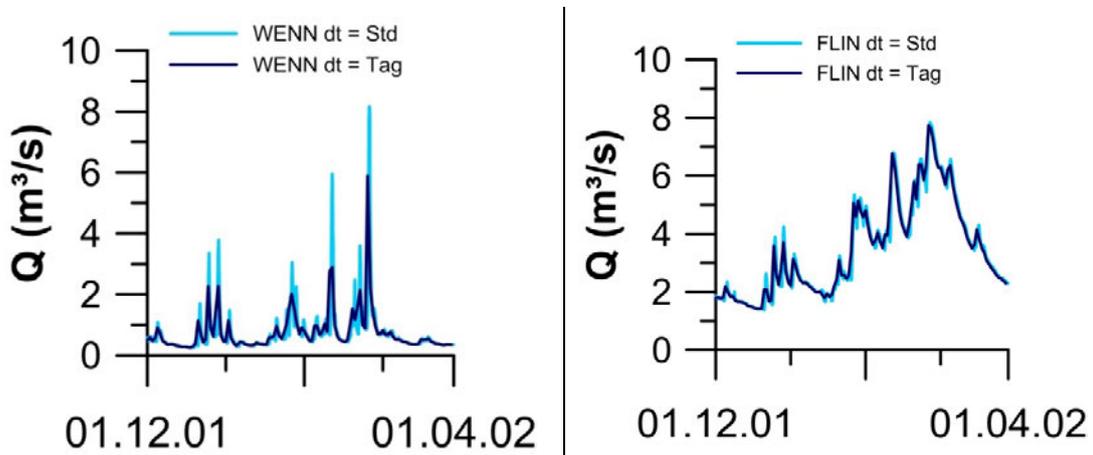
**Abb. 3:** Links: Relative Summenhäufigkeit der Anzahl der Schütze zur Entwässerung am Standort Brunsbüttel in der Zeitspanne von 2010 bis 2012. Schwerpunktmäßig werden 8 Schütze zur Entwässerung verwendet. Rechts: Darstellung der auf der Basis einer einfachen hydraulischen Formel ermittelten Entwässerungsleistungen in Abhängigkeit der Wasserstandsunterschiede von Außen- und Binnenpegel, wenn in Brunsbüttel über 4 (hellgrün), 8 (oliv) bzw. 16 (rot) Schütze entwässert wird. Die Entwässerungsleistungen werden als negative Werte dargestellt, weil sie eine Verlustgröße für den Kanal darstellen. Die gestrichelten Linien zeigen Entwässerungsleistungen mit den Umläufen über die große Schleuse und die durchgezogene Linie veranschaulichen die Entwässerungsleistung ohne die Umläufe. Die Pfeile in der rechten Abbildung zeigen die Spannweiten der Entwässerungsleistungen am Standort Brunsbüttel beim mittleren Tideniedrigwasser (hellgrüner Pfeil) sowie beim niedrigsten Tideniedrigwasser (violetter Pfeil) in der Zeitreihe der hydrologischen Jahre 1998 bis 2014.

### 3 Modellierung der Hydrologie des Einzugsgebiets

Zur Simulation des zukünftigen Gebietszuflusses aus dem 1.530 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet bei sich verändernder Meteorologie wurde (wie eingangs beschrieben) das Wasserhaushaltsmodell LARSIM NOK aufgebaut. In Abb. 4 sind die Abflussganglinien zweier beispielhaft gewählter Pegel (links Wennbüttel im westlichen Teil, rechts Flintbek im östlichen Teil des Einzugsgebiets) während des Hochwasserereignisses im Februar 2002 (Flintbek HQ 7,84 m<sup>3</sup>/s am 27.02.2002 (1985-2011)) dargestellt.

Allein schon anhand der Form der Ganglinien wird die unterschiedliche Reaktion des Einzugsgebietes und damit auch eine weitere Herausforderung bei der Simulation des Gesamtzuflusses sichtbar: Der im westlichen Teil liegende Pegel Wennbüttel weist schmale Hochwasserganglinien und damit auf ein schnell reagierendes Gebiet hin. Im Gegensatz dazu ist die Abflussganglinie am Pegel Flintbek durch die oberhalb liegenden Seen beeinflusst und zeigt eine deutlich langsamere Gebietsreaktion. Die große Herausforderung bestand neben der Einschätzung der Güte der beobachteten Abflusswerte der einzelnen Pegel als Referenz für Kalibrierung und Validierung in der modelltechnischen Abbildung der durch eine ausgeprägte Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser charakterisierten Abflussbildungsprozesse, der Bewirtschaftung der Seen und der Steuerung der Schöpfwerke. Details hierzu im Abschlussbericht des WSV-Projektes.

Es wurden zwei LARSIM-Modelle aufgebaut, eins für den westlichen und eins für den östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes, um bei Verfügbarkeit eines ggf. möglichen besseren Ansatzes zur Abbildung der Wechselwirkung von Oberflächen- und Grundwasser als bisher geschehen (getestet wurden verschiedene LARSIM Funktionalitäten) diese teilweise oder vollständig ersetzen zu können.



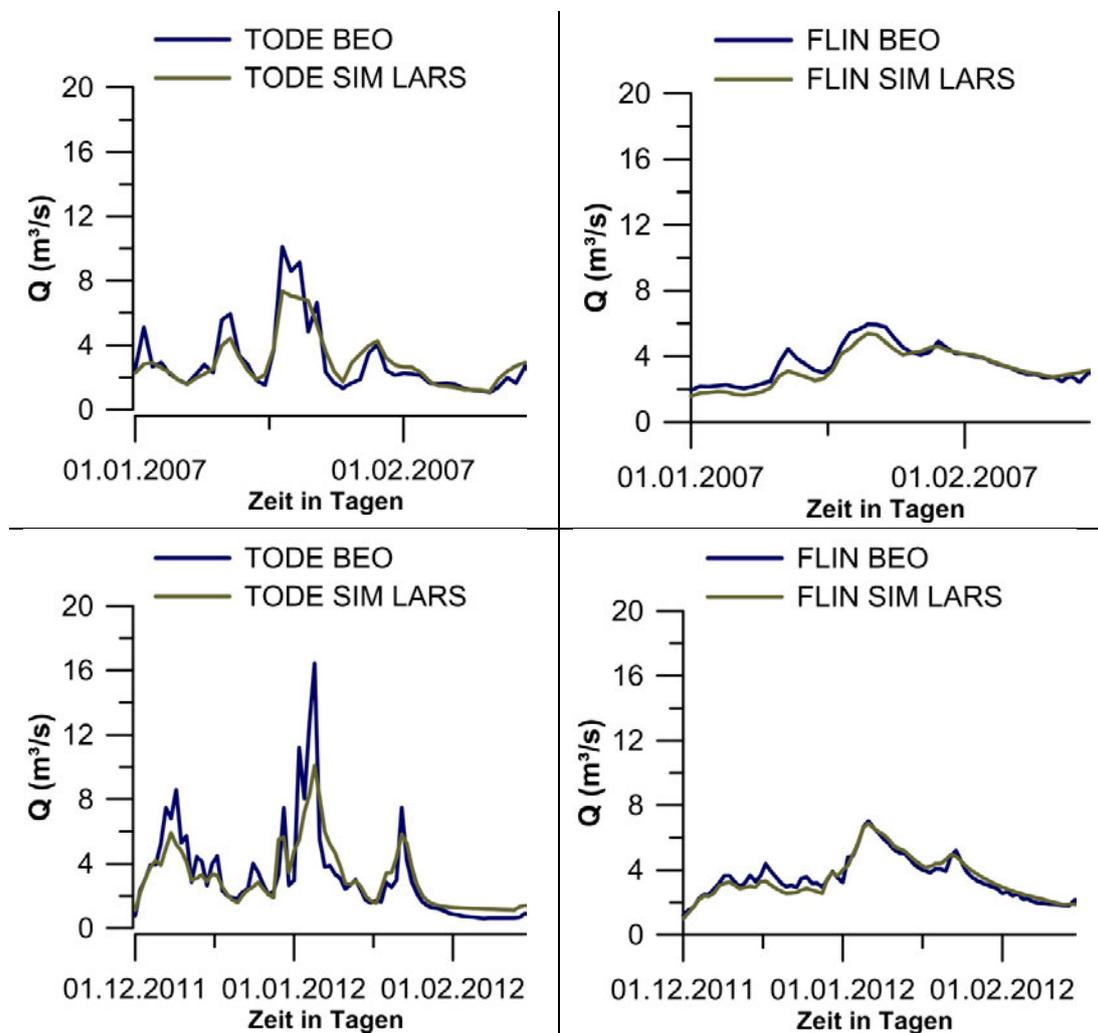
**Abb. 4:** Beobachtete Abflüsse im Tages- (dunkelblau) bzw. Stundenzschritt (hellblau) während des Hochwasserereignisses Februar 2002 an zwei unterschiedlichen Pegeln. Links: Wennbüttel im westlichen Teil des Einzugsgebietes mit schnellen Abflussreaktionen und rechts Flintbeck im östlichen Teil des Gebiets mit langsameren Abflussreaktionen (bedingt durch die oberstrom liegenden Seen).

Wie bereits eingangs dargestellt, sind 60 % des Gebiets messtechnisch nicht erfasst. Daher wurden für die Simulation die notwendigen Modellparameter für diesen Bereich auf der Basis der naturräumlichen Kriterien regionalisiert.

In Abb. 5 sind für die zwei anhand von Wasserstandsdaten im Kanal identifizierten Ereignisse Januar 2007 und 2012 die Abflusssimulation für zwei Pegel (Todenbüttel im westlichen Teil und Flintbek im östlichen Teil) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die großen Hochwasserereignisse im Bereich des östlichen Hügellandes gut erfasst werden. Die Modelle tendieren zu einer systematischen Unterschätzung der Winterabflüsse im Bereich der Vorgeest und der Hohen Geest.

Es stellte sich die Frage, ob die Ursache für die Unterschätzung der beobachteten Hochwasserereignisse insbesondere im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes der gewählte Zeitschritt (Tageswerte), das gewählte Modell oder die Eingangsdatenbasis ist. Die Auswirkungen der Zeitschrittweite wurden im Rahmen des Projekts noch untersucht: Für beispielhaft ausgewählte westliche Gebiete mit einem hohen Grundwasserstand wurde zusätzlich ein Stundenwertmodell aufgebaut. Die Pegel Wennbüttel und Todenbüttel wurden entsprechend nachkalibriert. Es zeigte sich eine weitgehend vergleichbare Modellanpassung auf Stundenwertbasis wie die Kalibrierung im Tageswertschritt. Die systematische Unterschätzung der Hochwasserspitzen in den westlichen Modellbereichen wurde durch die höhere zeitliche Diskretisierung nicht nachhaltig behoben. Es wurden zwar einige Abflussscheitel besser getroffen (wie beim Pegel Todenbüttel), die Unterschätzung des Abflussvolumens bleibt jedoch

durchgängig bestehen. Die Auswertung zeigt, dass die Verfeinerung des Zeitschrittes keine grundlegenden Änderungen der Simulationsergebnisse bewirkt hat und damit nicht geeignet erscheint, die bei der Tageswertsimulation auftretenden systematischen Fehler zu beheben.



**Abb. 5:** Simulation der Zuflüsse mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM NOK für zwei beispielhaft ausgewählte Pegel im westlichen (links Todenbüttel) und östlichen Teil (rechts) des Untersuchungsgebietes für zwei Ereignisse, die zu kritischen Situationen in der Bewirtschaftung des Kanals führen. Die Unterschätzung der beobachteten Abflüsse (auf Tageswertbasis) ist insbesondere am Pegel Todenbüttel (MHQ 13,1 m<sup>3</sup>/s, HQ 30,5 m<sup>3</sup>/s am 09.08.2002 (1972-2011)) zu erkennen. Hydrologische Kennzahlen für den Pegel Flintbek MHQ 4,92 m<sup>3</sup>/s, HQ 7,84 m<sup>3</sup>/s am 27.02.2002 (1985-2011).

## 4 Modellierung der Wasserbewirtschaftung

Für die Simulation der Wasserbewirtschaftung wurde (wie eingangs dargestellt) das Steuermodell BEWASY NOK im Stundenzeitschritt aufgebaut. In der ersten Annahme wird (in Orientierung an die mittleren tatsächlich beobachteten Wasserstände im Kanal) modelltechnisch gesteuert auf einen konstanten (Ziel-)Wasserstand von 5 m PN. Eingangszeitreihen in das Steuermodell sind der Zufluss aus dem Einzugsgebiet (1), der Zu- bzw. Abstrom durch

den Betrieb der Schleusen in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau (2), Verdunstung von der Haltungsoberfläche (3) sowie Niederschlag auf die Haltungsoberfläche (4). Die letzten drei genannten Größen haben jedoch aufgrund ihres mengenmäßigen Anteils an der Kanalbilanz nur eine untergeordnete, fast vernachlässigbare Bedeutung für die Wasserbewirtschaftung. Die sich ändernden Wasserstände in Nord- und Ostsee wurden über die Beobachtungen in Brunsbüttel (AP, zusammengesetzte Wasserstandsreihe der Pegel Brunsbüttel Mole 1, Brunsbüttel Mole 4 und den angepassten Werten des Pegels Cuxhaven) und Kiel-Holtenau (AP) erfasst. Für die Entwässerungsleistung am Standort Brunsbüttel wird eine Kurve aus der rechten Abb. 3 angenommen. Analog erfolgt dies auch für den Standort Kiel-Holtenau. Entwässert wird im Modell, wenn die beobachteten Außenwasserstände geringer sind als der simulierte Kanalwasserstand. Ist eine Entwässerung an beiden Standorten möglich, erfolgt eine Gleichverteilung (50 % Brunsbüttel, 50 % Kiel-Holtenau) der zu entwässernden Wasservolumina. Ist die maximale Entwässerungskapazität ausgeschöpft, wird das restliche Wasservolumen auf den anderen Standort übertragen. Der simulierte Wasserstand steigt im Kanal über den (Ziel-)Wasserstand, wenn die dargebotserhöhenden Zuströme (mengenmäßig das Zuflussvolumen aus dem Einzugsgebiet minus Abstrom durch Schleusenbetrieb und Verdunstung von der Haltungsoberfläche) die Entwässerungskapazitäten überschreiten. Das Steuermodell ist aufgebaut worden für Szenarienrechnungen (bzw. Langzeitsimulationen) und steuert daher auf einen (einigen) konstanten Wasserstand für den gesamten Kanal. Effekte wie Schwall und Sunk bzw. Windstau werden nicht simuliert. Das ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Es wurden Sensitivitätsuntersuchungen (Ergebnisse hier nicht dargestellt) zu den Auswirkungen der initialen prozentualen Aufteilung der Entwässerungsmengen auf die Standorte Brunsbüttel und Kiel-Holtenau, wenn die Außenwasserstände geringer sind als der simulierte Kanalwasserstand, durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass die Aufteilung (von Gleichverteilung zu 80 % Brunsbüttel, 20 % Kiel-Holtenau bzw. 20 % Brunsbüttel, 80 % Kiel-Holtenau) einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Höhe des simulierten Kanalwasserstandes hat. Daher werden die weiteren Simulationen mit einer Gleichverteilung der Aufteilung durchgeführt.

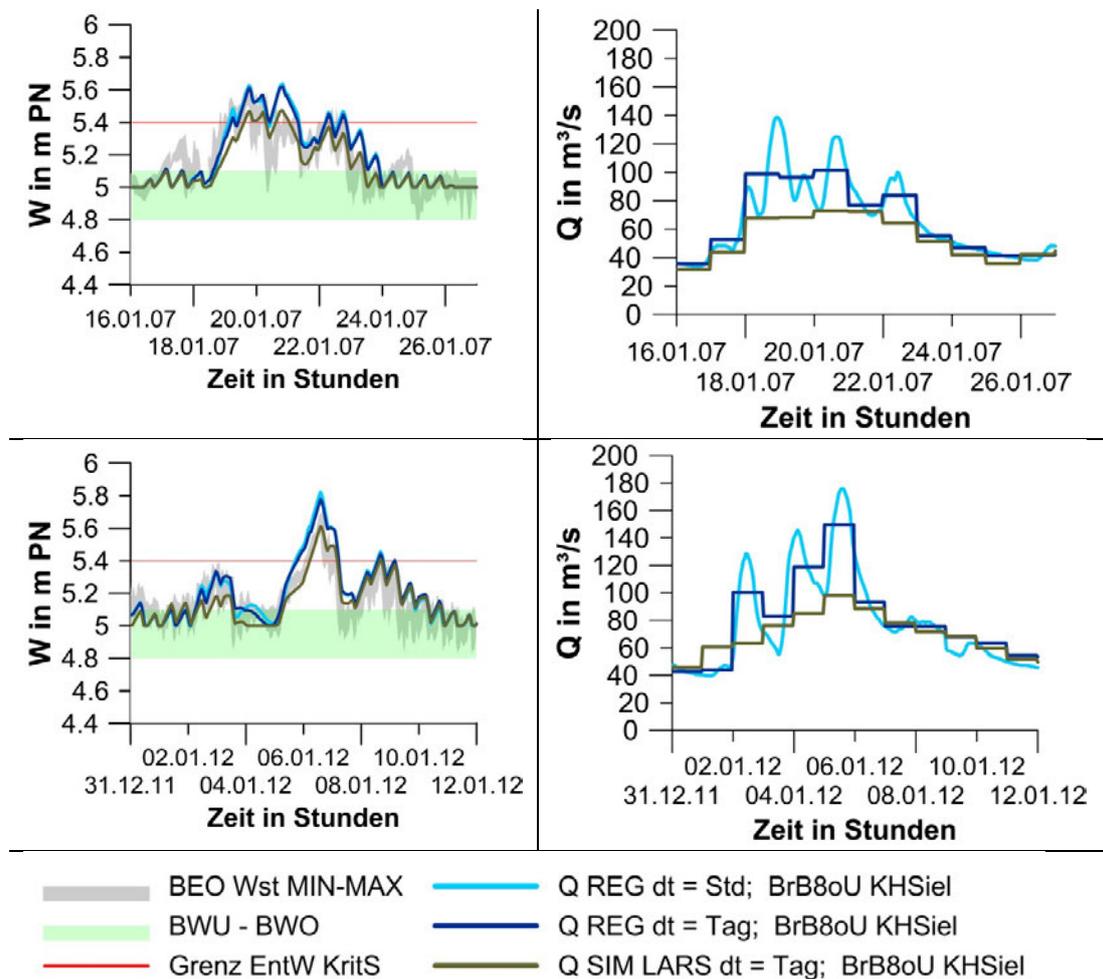
In den vorangegangenen Abschnitten wurde sowohl die Spannweite der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet (resultierend aus der regionalisierten Stundenwertreihe, aus der regionalisierten Tageswertzeitreihe (beide Abschnitt 2.2) als auch aus der simulierten Tageswertreihe (Abschnitt 3)) als auch die Wahl der Entwässerungsorgane (Abschnitt 2.3) diskutiert.

Es stellt sich die Frage, welche Auswirkungen diese Spannweiten (bzw. welche Unsicherheiten) für die Simulation der Kanalwasserstände haben. Daher wurden entsprechende Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend vorgestellt werden. Aufgrund der Tatsache, dass nur für die identifizierten Ereignisse Januar 2007 und Januar 2012 beobachtete Kanalwasserstände in geeigneter zeitlicher Auflösung vorliegen, wurden diese als Referenz verwendet.

#### **4.1 Variation der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet**

Das Kanalbilanzmodell BEWASYS NOK wurde wie folgt parametrisiert: Die Entwässerung in Brunsbüttel erfolgt über 8 Schütze ohne Umläufe (siehe oliv durchgezogene Linie in der rechten Abb. 3) und in Kiel-Holtenau über das Siel. Diese Annahme bleibt unverändert in dieser Sensitivitätsuntersuchung, ebenso wie die Abbildung von Zu- und Abstrom durch den Schleusenbetrieb, Niederschlag auf die Haltungsoberfläche und Verdunstung.

Der Zufluss aus dem Einzugsgebiet wird jedoch variiert. Die drei (zuvor diskutierten) Zuflussreihen finden Eingang in das Modell (Farbwahl konstant im gesamten Dokument, hellblau regionalisierte Stundenreihe REG dt = Std, dunkelblau regionalisierte Tagesreihe REG dt = Tag, oliv SIM LARS dt = TAG). Die simulierten Zeitreihen mit den Hochwasserscheitelzuflüssen sind in der rechten Abb. 6 für 2007 (oben) und für 2012 (unten) zu erkennen. In der linken Abb. 6 sind die entsprechend der oben angenommenen Entwässerungsstrategie simulierten Kanalwasserstände in Abhängigkeit der verwendeten Zuflussreihe (s. o.) für die Ereignisse Januar 2007 (oben) und Januar 2012 (unten) dargestellt. Zusätzlich zu erkennen sind die Spannweiten der mittleren beobachteten Wasserstände (grau hinterlegt, bekannt bereits aus Abb. 2), hellgrün die Bewirtschaftungslamelle und als rote Linie die kritische Grenze der Entwässerung.



**Abb. 6:** Simulierte Kanalwasserstände im Januar 2007 (links oben) und Januar 2012 (links unten). In der rechten Abbildung sind die regionalisierten (REG) und simulierten (SIM) Zuflussganglinien für beide Ereignisse angegeben.

Es ist zu erkennen, dass die simulierten Kanalwasserstände auf der Grundlage der regionalisierten Zuflussreihen den oberen Rand der Spannweite der beobachteten Wasserstände am 19.01.2007 gut darstellen. Die simulierten Kanalwasserstände auf der Basis der simulierten Zuflussreihe geben den unteren Rand der Spannweite der beobachteten Wasserstände am

19.01.2007 gut wieder. Der simulierte Kanalwasserstand (auf der Basis der regionalisierten Zuflussreihen) am 20.01.2007 überschätzt die Spannweite der Beobachtungen, wohingegen der obere Rand gut wiedergegeben wird durch den simulierten Kanalwasserstand auf der Basis der simulierten Zuflussreihe. Im Ereignis 2012 überschätzen die simulierten Kanalwasserstände (auf der Basis der regionalisierten Zuflussreihen) die Spannweite der beobachteten Wasserstände am 06.01.2012. Die simulierten Kanalwasserstände auf der Grundlage der simulierten Zuflussreihe liegen zwischen unterem Rand und Mittelwert der Spannweite der beobachteten Wasserstände. Der simulierte Wasserspiegelanstieg auf der Grundlage der simulierten Zuflussreihe am 08.01.2012 liegt am oberen der Spannweite der beobachteten Wasserstände. Die simulierten Zuflüsse auf der Grundlage der regionalisierten Zuflussganglinie überschätzen die beobachteten Wasserstände leicht. Es zeigt sich in beiden Ereignissen, dass die Wahl der Zeitschrittweite (Stunden- oder Tageszeitschritt) für die Simulation der Kanalwasserstände (mit diesem Modell) eine geringere Relevanz hat als die Höhe des Zuflusses. An weiteren Ereignissen ist die Übertragbarkeit dieser Aussage zu prüfen. Die Ergebnisse gelten nur unter der Annahme der oben genannten Entwässerungsstrategie.

Unter Annahme der drei verschiedenen Zuflussganglinien und der oben genannten Entwässerungsstrategie von 8 Schützen (ohne Umläufe) in Brunsbüttel und einer Sielentwässerung in Kiel-Holtenau wurden die Kanalwasserstände für die zusätzlich identifizierten Ereignisse Februar 2002 und Juli 2002 simuliert. Die Ergebnisse werden an dieser Stelle jedoch nicht dargestellt, da neben den bekannten Unsicherheiten (Höhe des tatsächlichen Zuflusses aus dem Einzugsgebiet und Güte der Entwässerungs-Abgabe-Beziehung) noch Informationen zu beobachteten Kanalwasserständen fehlen. Damit ist der Freiheitsgrad der Simulation zu groß. Hier sollte eine Verdichtung der Datenbasis der Wasserstände angestrebt werden.

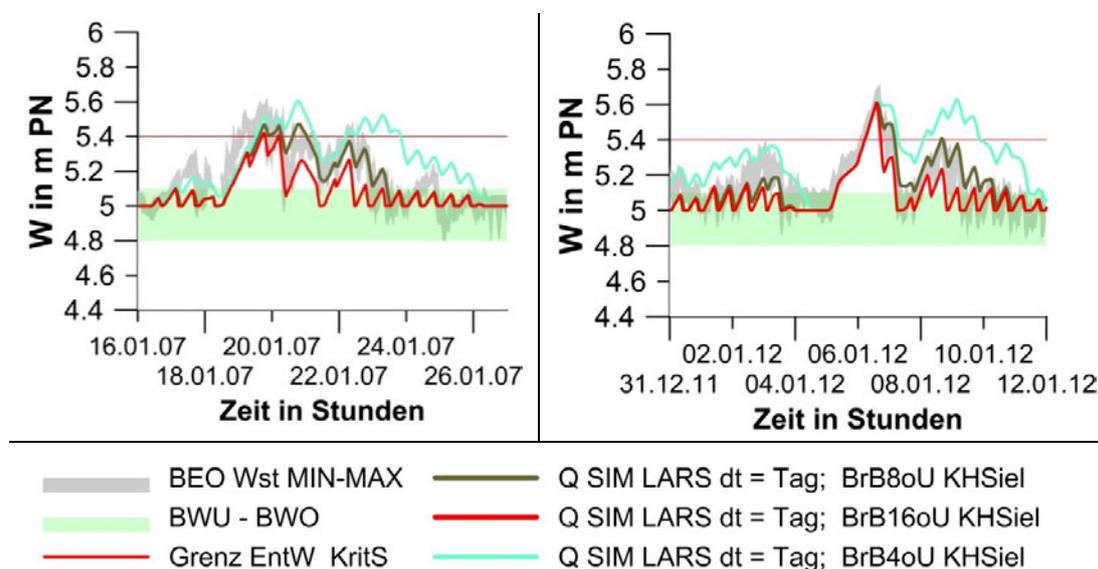
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Spannweite der beobachteten maximalen Wasserstände (der hier vorgestellten Ereignisse) im Mittel bei 11 cm liegt. Für die simulierten (maximalen) Kanalwasserstände auf der Grundlage der drei verschiedenen Zuflussreihen aus dem Einzugsgebiet und unter Annahme der o. g. Entwässerungsleistung ergeben sich im Mittel Spannweiten um 17 cm.

#### **4.2 Variation der Entwässerungskapazitäten am Standort Brunsbüttel**

Es stellt sich weiterhin die Frage, inwieweit die Annahmen zur Entwässerung (insbesondere für das 2007 Ereignis ohne Datenbasis) die Höhe des simulierten Kanalwasserstandes beeinflussen. Vor diesem Hintergrund wurden erneut Simulationsrechnungen mit dem Modell BEWASYS NOK nun unter folgenden Annahmen durchgeführt: (1) der simulierte Gebietszufluss zum Kanal wird nicht verändert und entspricht dem simulierten Zufluss aus dem Wasserhaushaltsmodell (SIM LARS dt = Tag), (2) die Entwässerung in Kiel-Holtenau erfolgt über das Siel und bleibt ebenso unverändert, (3) die Entwässerung in Brunsbüttel (ohne Umläufe) wird variiert: 4 Schütze (hellgrün), 8 Schütze (oliv) und 16 Schütze (rot). Je geringer die Anzahl der Entwässerungsschütze, desto geringer ist die Entwässerungskapazität. Die gewählte Farbwahl entspricht der rechten Abb. 3.

In Abb. 7 sind die simulierten Wasserstände im Vergleich zur Spannweite der beobachteten Wasserstände bei den Ereignissen Januar 2007 (links) und Januar 2012 (rechts) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die simulierte Entwässerung mit 4 Schützen am Standort Brunsbüttel erwartungsgemäß zu höheren Wasserzuständen führt als bei einer Entwässerung mit 8 bzw.

16 Schützen. Das Muster der simulierten Wasserstände unter Annahme einer Entwässerung von 4 Schützen am Standort Brunsbüttel stimmt wenig mit dem Muster der beobachteten Wasserstände (außer in den ersten Tagen des Ereignisses Januar 2012 vom 02. bis 04.01.) überein. Es kann vermutet werden, dass dieser Entwässerungsstrategie in der Praxis nicht gefolgt wurde. Nichtsdestotrotz ist es das Ziel, mit diesen Annahmen die Spannweite der simulierten Wasserstände zu ermitteln. Die Höhe des simulierten Kanalwasserstandes am 06.01.2012 ist unabhängig von der Entwässerungskapazität, was bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt aufgrund der hohen Außenwasserstände entwässert werden konnte. Der simulierte Kanalwasserstand am 08.01.2012 unter der Annahme, dass mit 8 Schützen in Brunsbüttel entwässert wird, befindet sich am oberen Rand der beobachteten Wasserstände. Die simulierten Kanalwasserstände unter den Annahmen, dass mit 4 bzw. 16 Schützen am Standort Brunsbüttel entwässert wird, führen zur Über- bzw. Unterschätzung der beobachteten Wasserstände am 08.01.2012.



**Abb. 7:** Simulierte Kanalwasserstände im Januar 2007 (links) und Januar 2012 (rechts) unter der Annahme verschiedener Entwässerungsleistungen am Standort Brunsbüttel. Die Zuflussganglinie aus dem Einzugsgebiet wurde mit dem Wasserhaushaltsmodell simuliert (nicht dargestellt).

Für die simulierten (maximalen) Kanalwasserstände auf der Grundlage der drei unterschiedlichen Entwässerungsleistungen unter Annahme eines gleichen Gebietszuflusses ergeben sich im Mittel Spannweiten um 17 cm und liegen somit in der gleichen Größenordnung wie unter der Annahme von den drei verschiedenen Gebietszuflüssen.

## 5 Zusammenfassung

Ziele der Untersuchungen sind die Identifizierung von kritischen tatsächlich abgelaufenen Situationen der Kanalbewirtschaftung mit der Ableitung ihrer erklärenden Indikatoren, um darauf aufbauend Aussagen zur ihrer Auftretenshäufigkeit in der Zukunft unter Berücksichtigung klimatischer und betrieblicher Veränderungen machen zu können. Für die Untersuchun-

gen wurde ein aus zwei Modellen bestehendes Modellsystem für die Wasserbewirtschaftung aufgebaut: das Wasserhaushaltsmodell LARSIM NOK für die Simulation des täglichen Zuflusses aus dem 1.530 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet und das Kanalbilanzmodell BEWASYS NOK zur Simulation der Entwässerungswassermengen an den Standorten Brunsbüttel und Kiel-Holtenau, um den vorgegebenen Zielwasserstand einhalten zu können.

Im vorliegenden Bericht werden die Herausforderungen aufgrund der Datenverfügbarkeit und ihrer Unsicherheit dargestellt und entsprechende Lösungsansätze diskutiert (nicht jedoch die Auswirkungen zukünftiger Veränderungen auf die Wasserbewirtschaftung). Die Herausforderungen bestehen in der eingeschränkten Verfügbarkeit zeitlich hoch aufgelöster Wasserstandsdaten der Vergangenheit zur Identifizierung von kritischen Situationen (Festlegung hier: Wasserstände über 5,40 m PN), in der Abschätzung des Gesamtzuflusses aus dem Einzugsgebiet sowie in der Ableitung (und Einschätzung der Güte) funktionaler Zusammenhänge von Wasserstandsdifferenzen und Entwässerungsleistungen.

Weiterhin werden die bestehenden Unsicherheiten bei der hydrologischen Modellierung sowie die entsprechenden Auswirkungen auf die Simulation der Kanalbewirtschaftung über Sensitivitätsuntersuchungen analysiert und diskutiert. Die Auswertungen erfolgen beispielhaft anhand der kritischen Ereignisse in der Kanalbewirtschaftung im Januar 2007 und 2012.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand wird eingeschätzt, dass die Unsicherheiten in der Simulation der Wasserstände im Kanal bedingt durch den abgeschätzten (und nicht tatsächlich messbaren) Gebietszufluss in der gleichen Größenordnung (ca. 17 cm) liegen wie die Annahmen zur Entwässerungsleistung bei Wasserstandsdifferenzen von beobachteten Außen- und Binnenpegeln. Diese Erkenntnis speist sich aufgrund der Datenverfügbarkeit aus den beiden oben genannten Ereignissen.

Diese komprimierte Darstellung zur Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals wird fachlich detaillierter untersetzt im Abschlussbericht des WSV-Auftrages.

## **Danksagung**

Dem Deich- und Hauptsielverband Dithmarschen wird an dieser Stelle ganz ausdrücklich gedankt für die Bereitstellung der Daten und für die gute Zusammenarbeit.

## **Literatur**

- Aquantec (2015): Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells auf der Basis des Modellsystems LARSIM für den Nord-Ostsee-Kanal. Bearbeitung im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, unveröffentlicht
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg
- DHSV Dithmarschen (2016): Bereitstellung von zeitlich hoch aufgelösten Kanalwasserstandsdaten (unveröffentlicht)

- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 238, DVWK, Bonn
- DWD (2013): REGNIE – regionalisierte Niederschläge – Verfahrensbeschreibung und Nutzeranleitung.  
[https://www.dwd.de/DE/leistungen/regnie/download/regnie\\_beschreibung\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.dwd.de/DE/leistungen/regnie/download/regnie_beschreibung_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (Abruf 20.02.2017)
- DGJ (2014): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Elbegebiet Teil III – Untere Elbe ab Havelmündung, hydrologische Jahr 2011. Herausgeber: Freie und Hansestadt Hamburg, Hamburg Port Authority
- PREUB, P. (2010): Programm zur Bewirtschaftung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme Version 1.1, Systemeditor WASED 2.0. Bearbeitung am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, unveröffentlicht
- PREUB, P. (2014): Programmsystem BEWASYS NOK – Plausibilisierung Tageswertmodell und Umstellung auf Stundenzeitschritte. Bearbeitung am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, unveröffentlicht
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, Offenbach am Main
- WSA Brunsbüttel (2016): Anweisung für die Entwässerung des Nord-Ostsee-Kanals. Az: 221.7/06, unveröffentlicht

**Kontakt:**

**Dr.-Ing. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach**

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261/ 1306 5187

E-Mail: [EbnerVonEschenbach@bafg.de](mailto:EbnerVonEschenbach@bafg.de)

# Simulationsverfahren zum optimierten Betrieb von Talsperren und Staustufen

Stephan Theobald, Alexander Rötz und Christian Bouillon

## 1 Einleitung

Bau und Betrieb von Talsperren und Staustufen sind seit jeher eng mit der Nutzung der Ressource Wasser verbunden. Durch den künstlichen Aufstau des Gewässers und der damit einhergehenden Wasserspeicherung wird ein Ausgleich zwischen dem natürlich vorhandenen Wasserdargebot und dem Bedarf an Wasser für die Erfüllung unterschiedlicher Bedürfnisse wie z. B. Energiegewinnung aus Wasserkraft, Hochwasserschutz, Wasserbereitstellung für Bewässerungen, Trinkwasserversorgung und Binnenschifffahrt geschaffen.

Aus den unterschiedlichen Nutzungsanforderungen resultiert ein Interessenskonflikt in der Bewirtschaftung von Talsperren und Staustufen, und es ergibt sich die Optimierungsaufgabe, mit welcher Betriebsweise die Wassernutzungseffizienz gesteigert werden kann. Während an Talsperren im Allgemeinen große Speichervolumina vorhanden sind und die Betriebsweise im operationellen und zumeist manuellen Betrieb von einer geringen Dynamik geprägt ist, ist der vermehrt durch innovative Leittechniken automatisiert ausgelegte Betrieb an Staustufen durch eine hohe Systemdynamik mit geringen Wasservolumina gekennzeichnet.

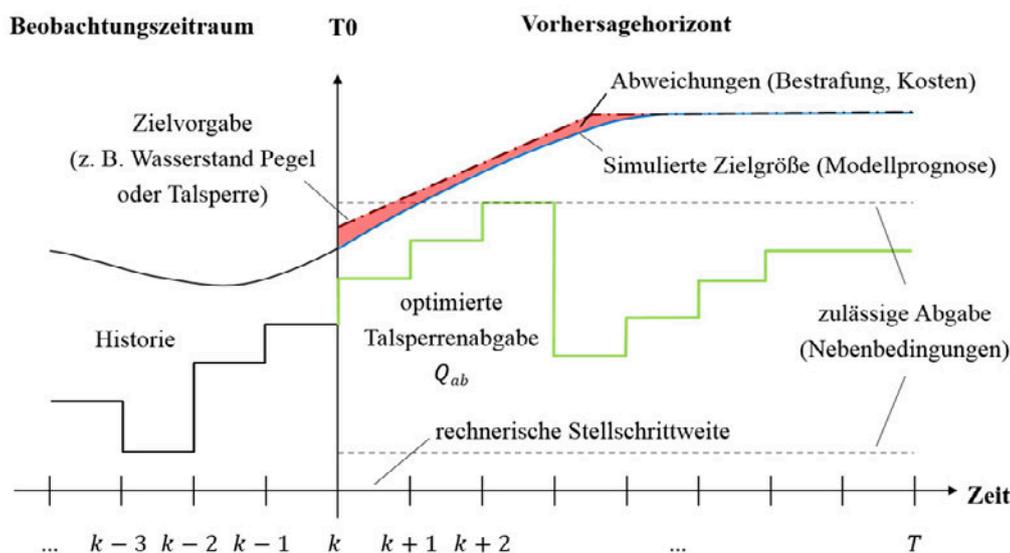
Zur Ableitung von effizienten Bewirtschaftungsstrategien und Betriebsweisen an Talsperren und Staustufen kommen heute vermehrt innovative Simulationsverfahren zum Einsatz. Sie dienen bspw. im manuellen oder teilautomatisierten Regelungsprozess der Entscheidungsunterstützung zur Wahl einer geeigneten Betriebsstrategie im Echtzeitbetrieb oder im vollautomatisierten Regelungsprozess einer Staustufe zur effizienten Auslegung von komplexen Regelungsstrukturen und dessen Parametrisierung. Im Folgenden wird der Einsatz von Simulationsverfahren zur Optimierung des wasserwirtschaftlichen Betriebs anhand ausgewählter Beispiele dargelegt.

## 2 Operationeller Betrieb von Talsperren

### 2.1 Simulationsverfahren zur Entscheidungsunterstützung

Die Bewirtschaftung von Talsperren mit vielfältigen Nutzungen stellt im ereignisbezogenen Echtzeitbetrieb eine besondere Herausforderung dar. Um in Abhängigkeit der äußeren Einflussfaktoren eine vorausschauende Planbarkeit zu gewährleisten und in der Praxis eine optimale Betriebsweise festzulegen, sind möglichst gute Abflussvorhersagen sowie fundierte

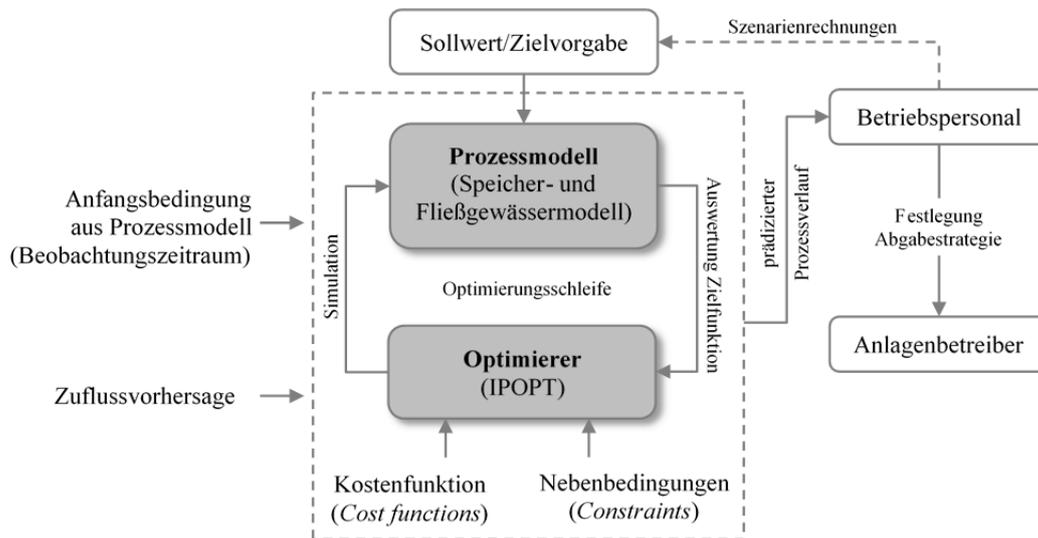
Kenntnisse zur hydraulischen Wirkung von Abgabestrategien auf das gesamte wasserwirtschaftliche System erforderlich. Durch Kopplung von hydraulischen Berechnungsmodellen mit Optimierungsverfahren und deren Einbettung in eine Vorhersageumgebung kann die Betriebsweise im Echtzeitbetrieb optimiert werden. Dieser auf einem simulationsgestützten Prozessmodell basierende iterative Optimierungsansatz wird in der Regelungstechnik unter dem Begriff der modellbasierten prädiktiven Regelung (MPR) zusammengefasst (DITTMAR & PFEIFFER 2004). Bei diesem Regelungsverfahren wird auf Grundlage eines Anfangszustandes zum Vorhersagezeitpunkt  $T_0$  und den gebietspezifischen Zuflussvorhersagen wiederholt ein internes Prozessmodell zur Abbildung der vollständigen Systemdynamik verwendet, um daraufhin die Wirkungsweise von bedeutsamen Zustandsgrößen (Modellprognose) des zu regelnden Systems (z. B. Zielgrößen an Pegel und/oder Talsperre) vorherzusagen (Abb. 1). Dieser Prozess wird solange – mit einer immer neuen vom Optimierungsalgorithmus gewählten Betriebsstrategie – durchlaufen, bis ein definiertes Abbruchkriterium erreicht wird. Dabei wird anhand einer Kostenfunktion und unter Verwendung von numerischen Optimierungsalgorithmen die optimale Betriebsstrategie im Vorhersagezeitraum als eine Folge von Stellgrößenänderungen (Talsperrenabgabe) ermittelt. Unter Berücksichtigung der zulässigen Abgabemengen (Nebenbedingung) werden vom Optimierungsalgorithmus die einzelnen Stellschritte derartig angepasst, dass die über Kostenfunktionen quantifizierbaren Abweichungen zwischen simulierter Zielgröße und Zielvorgabe minimiert werden.



**Abb. 1:** Konzept der modellbasierten prädiktiven Regelung im operationellen Talsperrenbetrieb (RÖTZ & THEOBALD 2016)

Hierfür sind dem Optimierungsalgorithmus im operationellen Betrieb die Zustandsbeschränkungen (Nebenbedingungen) sowie die betrieblichen Randbedingungen für die bewertungsrelevanten Bewirtschaftungsziele (z. B. Zielwasserstand Talsperre, Abflussminderung Unterwasserpegel) vorzugeben. Auf Grundlage der abschließend gefundenen Lösung können vom Betreiber weiterführende Szenarienrechnungen durchgeführt oder eine geeignete Abgabestrategie abgeleitet werden. Die Entscheidung zur abschließenden Festlegung einer Betriebsstrategie obliegt immer dem Betriebspersonal (Abb. 2). Insofern im operationellen

Betrieb neue gebietspezifische Prognosedaten verfügbar sind, kann dieser Prozess erneut durchlaufen werden, um die zuletzt getroffene Steuerentscheidung, die Zielerreichung sowie das Eintreffen der prognostizierten Zuflussinformationen zu überprüfen.



**Abb. 2:** Entscheidungsprozess zur Festlegung einer Betriebsstrategie im operationellen Betrieb einer Talsperre (RÖTZ & THEOBALD 2016)

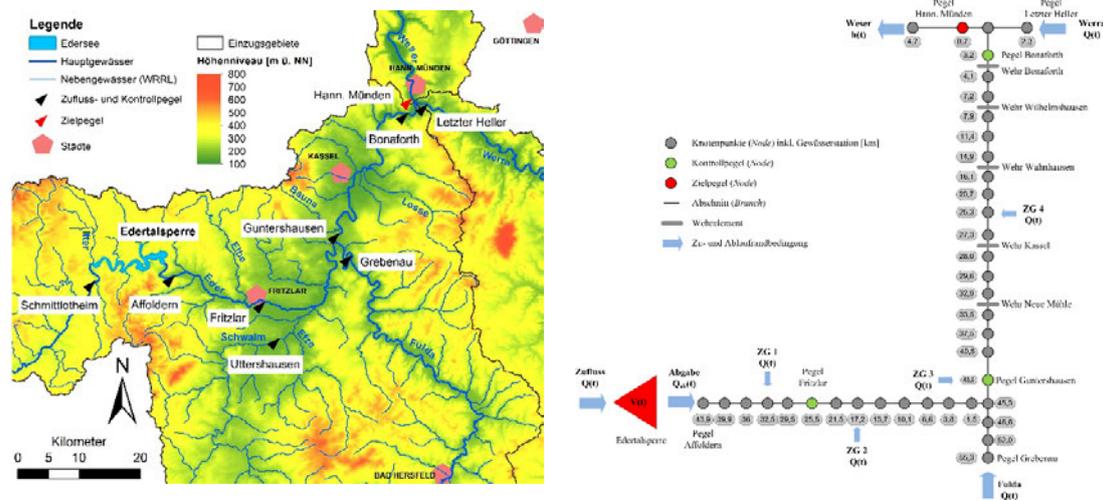
## 2.2 Modellierung des wasserwirtschaftlichen Systems

Die Ergebnisse der simulierten Zustandsgrößen (Modellprognose) dienen als Entscheidungshilfe und sollten daher ein hohes Vertrauen zugesprochen bekommen können. Voraussetzung für den operationellen Einsatz und zur Entscheidungsunterstützung ist, dass mit dem Prozessmodell die Talsperrenbilanzierung mit einem Speichermodell und die hydrodynamische Analyse des Wellenablaufs in der Gewässerstrecke mit einem Fließgewässermodell in allen Abflussbereichen möglichst genau beschrieben werden. Die Notwendigkeit eines detaillierten Fließgewässermodells ergibt sich insbesondere dann, wenn der Steuerpegel weit unterhalb der Talsperre liegt. Mit der Kopplung von Speicher- und Fließgewässermodell werden die Auswirkungen einer Talsperrenabgabe auf die Gewässerstrecke unterhalb der Talsperre dargestellt. Als wesentliche Kenngröße wird dabei der zeitliche Abflussverlauf an ausgewählten Gewässerstationen ermittelt. Aus Sicht der Talsperrenbewirtschaftung sind neben der Wellenlaufzeit die Retentionseffekte des Gewässersystems bestmöglich wiederzugeben.

Zugleich müssen die Simulationsverfahren im operationellen Betrieb ein zuverlässiges Laufverhalten mit stabilen Simulationen aufweisen. Da das Prozessmodell die nichtlineare Dynamik der strömungsmechanischen Vorgänge innerhalb der Gewässerstrecke möglichst exakt beschreiben muss, ist für die wiederholten Simulationen und für die Lösung des nichtlinearen Optimierungsproblems mit einem erheblichen numerischen Rechenaufwand zu rechnen. Aus diesem Grund werden für diesen Anwendungsbereich zugunsten des Rechenaufwandes effiziente hydrodynamisch-numerische Berechnungsverfahren eingesetzt, die zumeist auf Vereinfachungen der 1D-Saint-Venant-Gleichungen basieren.

### 2.3 Anwendungsbeispiel

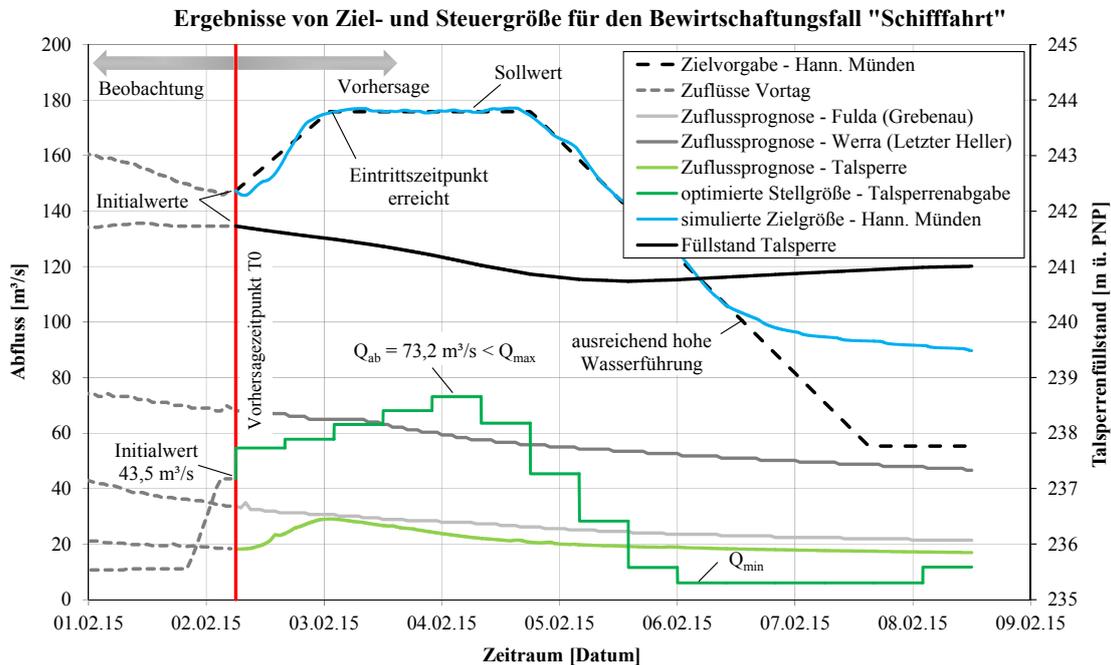
Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurde ein auf den freien Software-Produkten RTC-Tools (SCHWANENBERG & BECKER 2015) und Delft-FEWS (WERNER et al. 2013) basierendes und operationell zu betreibendes Optimierungsmodell für die Bewirtschaftung der im Bundeseigentum befindlichen Edertalsperre entwickelt (RÖTZ et al. 2016). Das Modellsystem berücksichtigt die komplexen und vielschichtigen Nutzungsanforderungen (z. B. Niedrigwasseraufhöhung/Schifffahrt, Hochwasserschutz, Wasserkraft) sowie die örtlichen Rahmenbedingungen an den Gewässerabschnitten unterhalb der Talsperre (Abb. 3) und knüpft an Vorhersagedaten vorgeschalteter hydrologischer Modelle der BfG (CEMUS & RICHTER 2008) sowie der Abfluss- und Wasserstandsvorhersage (BRAHMER 2009) vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) an. Unter diesen Gesichtspunkten ermittelt das Optimierungsmodell eine im Hinblick auf die Talsperrenbilanz und der Wellenfortpflanzung in den Gewässerabschnitten bestmögliche Talsperrenabgabe für die Folgetage und dient somit für den Betreiber als Entscheidungsunterstützungssystem. Das wasserwirtschaftliche Prozessmodell bildet die rund 106 km lange Gewässerstrecke zwischen der Edertalsperre und dem Pegel Hann. Münden mit 38 Berechnungselementen ab und nutzt die in RTC-Tools implementierte vereinfachte Bewegungsgleichung des diffusiven Wellenablaufs (SCHWANENBERG & BECKER 2015). Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem Berechnungsverfahren eine gute Annäherung an die voll dynamische Lösung erreicht wird und der numerische Lösungsaufwand gering ausfällt (RÖTZ 2016).



**Abb. 3:** Untersuchungsgebiet der Edertalsperre mit relevanten Fließgewässern und Pegeln (links) sowie System des Speicher- und Fließgewässermodells mit Berechnungselementen, Randbedingungen, Pegeln und Gewässerstation (RÖTZ et al. 2016)

Im Optimierungsmodell werden derzeit die speziellen Anforderungen der Bewirtschaftungs-fälle „Schifffahrt“, „Niedrig- und Mittelwasser“ sowie „Hochwasser“ als getrennt formulierte Optimierungsprobleme berücksichtigt (RÖTZ et al. 2016). Für das in Abb. 1 beispielhaft dar-gelegte Fallbeispiel zur schifffahrtsbedingten und kurzfristigen Stützung des Wasserstandes/Abflusses am Pegel Hann. Münden wird die Verwertbarkeit der Ergebnisse dargelegt. Neben den maßgeblichen prognostizierten Zuflussganglinien im Modellgebiet sind die optimierte Talsperrenabgabe (Stellgrößenfolge), die Zielvorgabe und die simulierte Abflussganglinie am Pegel Hann. Münden, der sich aus der Talsperrenbilanzierung ergebende Talsperrenfüllstand sowie die beobachteten Werte vom Vortag aufgetragen.

Die Ergebnisse für das Fallbeispiel zeigen, dass die prognostizierten Zuflüsse von Fulda und Werra nicht ausreichend sind, um den vom Anwender des Optimierungsmodells vorgegebenen Sollwert am Pegel Hann. Münden zu erfüllen. Ausgehend von der Anfangsbedingung zum Vorhersagezeitpunkt  $T_0$  erhöht der Optimierer die Talsperrenabgabe schrittweise auf einen Höchstwert von rund  $Q_{ab} = 73 \text{ m}^3/\text{s}$ . Unter Einhaltung der Nebenbedingung und im Sinne der Wasserersparnis nimmt die Stellgröße im weiteren Verlauf bis auf die Mindestwasserabgabe von  $Q_{ab} = Q_{min} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  ab. Ab diesem Zeitpunkt liegt eine ausreichend hohe Wasserführung vor, und eine zusätzliche Stützung ist nicht mehr erforderlich. Mit der Talsperrenabgabe und dem prognostizierten Talsperrenzufluss folgt aus der Speicherbilanzierung in den ersten drei Tagen eine Volumenabnahme von ca. 9,7 Mio.  $\text{m}^3$ , was umgerechnet einer Wasserstandsabnahme von etwa einem Meter entspricht.



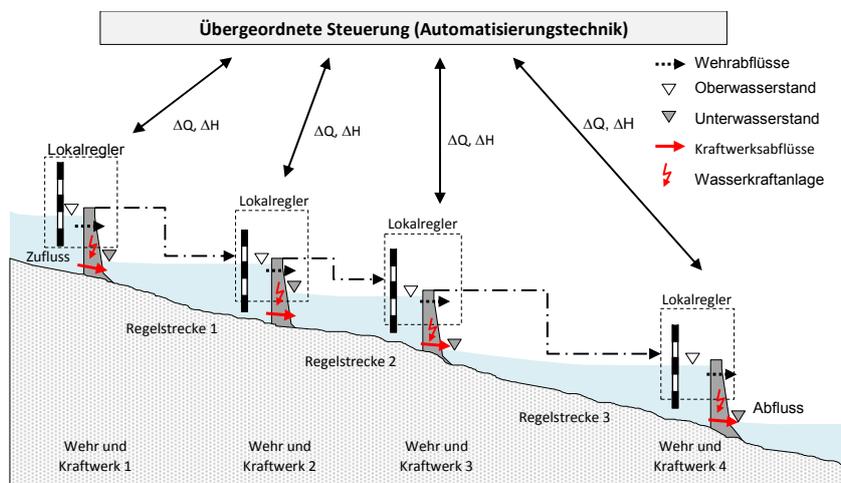
**Abb. 4:** Ergebnis einer Optimierungsrechnung für den Bewirtschaftungsfall „Schifffahrt“

Der gewünschte Eintrittszeitpunkt des Wellenscheitels nach rund 20 h wird mit der simulierten Stellgrößenfolge erreicht und kann fortan auf dem vorgegebenen Niveau mit nur geringfügigen Abweichungen von deutlich kleiner als  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  gehalten werden. Das Optimierungsmodell schlägt bereits mit dem ersten Stellschritt eine Erhöhung auf rund  $Q_{ab} = 55 \text{ m}^3/\text{s}$  vor, um den Scheitelpunkt der Zielvorgabe zu erreichen. Da sich die Zielvorgabe vom ansteigenden Wellenscheitel zeitlich sehr nah am Vorhersagezeitpunkt  $T_0$  befindet und aufgrund der Wellenlaufzeit (von Edertalsperre bis zum Pegel Hann. Münden) eine Systemreaktion erst in etwa 16 h zu erwarten ist, kann der Optimierer in den ersten Zeitschritten den Wellenanstieg nicht wie vorgegeben abbilden. Der Anwender sollte, wie vom Optimierer vorgeschlagen, eine sofortige Erhöhung der Talsperrenabgabe veranlassen, damit die Schifffahrt noch sicher bis zum anvisierten Zeitpunkt gestützt werden kann. Ergänzend dazu können die Ergebnisse durch individuelle Abgabeberechnungen verifiziert und verfeinert werden.

Die praktische Anwendbarkeit wurde durch eine intensiv begleitete Testphase beim Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hann. Münden sowie bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde belegt. Das Modellsystem zeichnet sich durch eine einfache Handhabung, hohe Programmstabilität, schnelle Rechenzeiten und hohe Genauigkeit aus (RÖTZ et al. 2016). Die Belastbarkeit der simulierten Steuer- und Zielgrößen vom Talsperren- und Fließgewässermodell ist dabei primär von der Eintrittswahrscheinlichkeit der Wetter- und Zuflussprognose abhängig. So gilt die Aussage, dass die Unsicherheiten mit länger andauerndem Vorhersagezeitraum zunehmen. Diesem Umstand kann im Praxisbetrieb Rechnung getragen werden, indem das Modellsystem auch mehrmals täglich mit aktualisierten Prognosedaten angewendet wird. Dadurch findet ein fortlaufender Abgleich zwischen beobachteten und simulierten Zustandsgrößen statt und der Anwender kann frühzeitig auf unerwartete Abweichungen reagieren. Es hat sich gezeigt, dass derartige Simulationsverfahren im operationellen Betrieb die Wahl einer effektiveren Betriebsstrategie mit verbesserter Zielerreichung unterstützen können.

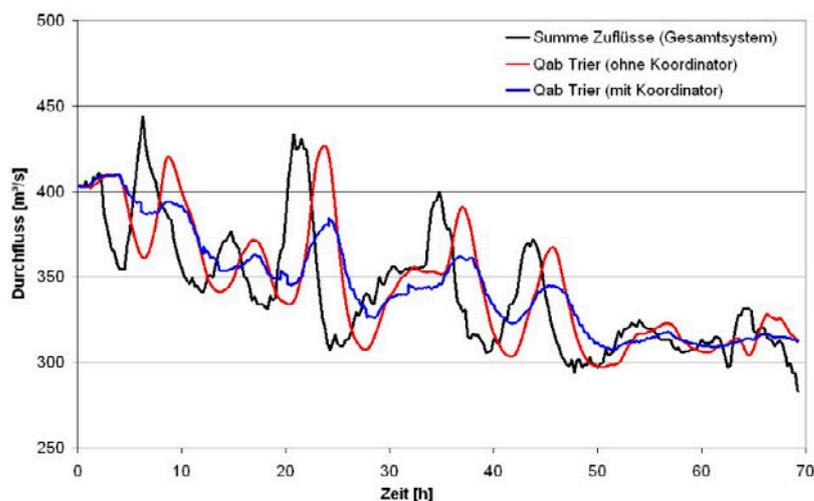
### 3 Automatisierter Betrieb von Staustufen

Die Steuerungsstrategien zum Betrieb von Staustufen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Erreichung von vielschichtigen und teilweise konträren Anforderungen (z. B. Wasserkraft, Schifffahrt, Hochwasserschutz, Brauch- und Nutzwasserentnahme, Gewässerökologie, Netzdienstleistungen). Im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen wird der Betrieb durch den Einsatz von modernen Wasserhaushaltsreglern (z. B. Stauzielregelung, OW/Q-Regelung) vermehrt automatisiert gestaltet, um die Anlagenbedienung zu erleichtern und die Betriebsweise zu verbessern. Durch Erweiterung der lokalen Regelung um eine koordinierte Steuerung einer ganzen Staustufenkette (vgl. Abb 5) können die multikriteriellen Ziele (z. B. Abflussvergleichmäßigung, Wellendämpfung, Leistungsregelung, Energie- und/oder Ertragsoptimierung, Pumpspeicherbewirtschaftung) besser erfüllt werden (THEOBALD & THEOBALD 2011). Dabei sind die vorhandenen Wasserressourcen unter Berücksichtigung von Umwelteinflüssen möglichst effizient und energetisch optimal auszunutzen.



**Abb. 5:** Staustufenkette mit lokalen Reglerstrukturen und übergeordneter Steuerung

Der Koordinator berücksichtigt für jede Stauhaltung sowohl Abflussvorgaben aus der Lokalregelung als auch die Vorgabe von ideal vergleichmäßigten Abflussganglinien, die aus dem Zufluss am oberstromigen Rand der Staustufenkette ermittelt werden. Somit verändert eine übergeordnete Steuerung den von der jeweiligen Lokalregelung vorgegebenen Abfluss aus einer Stauhaltung um eine zusätzliche Abflussänderung zur anschließenden Volumenein- bzw. Volumenauslagerung im Stauraum. Aus diesem Grund ist das für den Betrieb der einzelnen Lokalregler erforderliche Stauziel für jede Stauhaltung ebenfalls zu ändern. Als wesentliche Voraussetzung müssen derartige Steuerungskonzepte die hohe Abflussdynamik innerhalb der Stauhaltungen (Regelstrecke) im gesamten Abflussspektrum (von Niedrig- bis Hochwasser) berücksichtigen (THEOBALD 1999). Hierfür kommen effiziente eindimensionale hydrodynamisch-numerische (HN-)Verfahren zum Einsatz. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, komplexe Betriebsituationen unter Berücksichtigung der Anlagensteuerung modellhaft zu erproben und die lokalen Regler sowie die Struktur der übergeordneten Steuerung bestmöglich für den automatisierten Betrieb zu parametrisieren (THEOBALD 2008). Die Einsatzmöglichkeiten derartiger Simulationswerkzeuge sind durch zahlreiche Untersuchungen, z. B. an den Flüssen Neckar, Rhein, Ruhr, Wolga, Mosel, Lech und Donau, belegt. So wurde beispielsweise im Zuge der Modernisierung der oberen Moselstaustufen ein zweistufiges Automatisierungskonzept mit dem primären Ziel der Abflussvergleichmäßigung realisiert. In Abb. 6 sind die Abflüsse an der untersten Staustufe Trier mit und ohne koordinierte Bewirtschaftung dargestellt. Durch Einsatz der zentralen Steuerung werden die Zuflussschwankungen durch eine koordinierte Volumenein- und Volumenauslagerung in den Stauräumen deutlich reduziert.



**Abb. 6:** Abflüsse mit und ohne Koordinatorbetrieb

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Verschiedene Untersuchungen in den vergangenen Jahren haben gezeigt, dass die heutigen Simulationsverfahren ein wertvolles Werkzeug darstellen, um die Betriebsweise von wasserbaulichen Anlagen zu verbessern. So stellen möglichst gute Zuflussvorhersagen und zuverlässige Simulationsverfahren im operationellen Betrieb (Vorhersageumgebungen) von Talsperren/-verbundsystemen, von Hochwasserrückhaltebecken und/oder Poldern sowie der

Bewässerungs- und Kanalbewirtschaftung ein adäquates Hilfsmittel dar, um auf Grundlage von Simulationsergebnissen die bestmögliche Betriebsstrategie abzuleiten. Als vorteilhaft hat sich dabei die Kopplung mit mathematischen Optimierungsalgorithmen nach dem Prinzip einer modellbasierten prädiktiven Regelung erwiesen. Dem Betreiber werden im Echtzeitbetrieb die Wirkungen von verschiedenen Bewirtschaftungsstrategien bereits im Vorfeld dargestellt und mit gekoppelten Optimierungsansätzen Handlungsspielräume aufgezeigt. Auf dieser Basis können Zielkonflikte analysiert und geeignete Steuerungsanweisungen abgeleitet werden. Ein weiterer Anwendungsbereich von hydrodynamisch-numerischen Simulationsverfahren ist der vollautomatisierte Betrieb von Staustufen und Staustufenketten. Um eine effiziente Bewirtschaftung und einen sichereren Betrieb zu gewährleisten, sind die lokalen und ggf. auch übergeordneten Reglerstrukturen entsprechend zu parametrisieren.

## Literatur

- BRAHMER, G. (2009): Operationelle Wasserhaushaltsmodellierung zur Hochwasservorhersage in Hessen. Jahresbericht des HLNUG, S. 55-61
- CEMUS, J., K. RICHTER (2008): Bewirtschaftung der Edertalsperre. – In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hrsg.): Veranstaltungen 6/2008, Wasserbewirtschaftung und Niedrigwasser, Kolloquium am 26./27. Mai 2008 in Koblenz, S. 84-95
- DITTMAR, R. & B. M. PFEIFFER (2004): Modellbasierte prädiktive Regelung. Eine Einführung für Ingenieure. – Verlag Oldenbourg, München
- RÖTZ, A. (2016): Ein simulationsbasiertes Entscheidungshilfswerkzeug zur Optimierung der operationellen Talsperrenbewirtschaftung. – Dissertation, Kasseler Wasserbau-Mitteilungen, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Heft 21, Universität Kassel
- RÖTZ, A., C. BOUILLON, S. THEOBALD, J. HOHENRAINER, A.-D. EBNER VON ESCHENBACH (2016): Synthese von Praxiserfahrung und Modelloptimierung als Grundlage eines verbesserten Talsperrenbetriebes. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 37.16, S. 315-325
- RÖTZ, A., S. THEOBALD (2016): Einsatz simulationsgestützter Modelloptimierung im ereignisbezogenen Talsperrenbetrieb. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung 60 (6), 368-379.
- SCHWANENBERG, D., B. BECKER (2015): RTC-Tools, Software Tools for Modeling Real-Time Control. – Referenz Manual, Onlinezugriff, [http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/RTC\\_Tools\\_User\\_Manual.pdf](http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/RTC_Tools_User_Manual.pdf)
- THEOBALD, S. (2008): Simulationswerkzeuge zum automatisierten Betrieb von Staustufen, Wasserwirtschaft, Heft 6/2008, S. 10-13.
- THEOBALD, S. (1999): Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Nr. 201, Karlsruhe
- THEOBALD, U., S. THEOBALD (2011): Central Water Resources Management in a cascade of hydropower plants. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Delft, Niederlande, April 2011

WERNER, M., J. SCHELLEKENS, P. GIJSBERS, M. VAN DIJK, O. VAN DEN AKKER, K. HEYN-  
ERT (2013): The Delft-FEWS flow forecasting system. – Environmental Modelling &  
Software 40, 65-77

**Kontakt:**

**Prof. Dr.-Ing Stephan Theobald**

Universität Kassel

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Kurt-Wolters-Str. 3

34125 Kassel

Tel.: 0561/ 804 2679

E-Mail: [s.theobald@uni-kassel.de](mailto:s.theobald@uni-kassel.de)

# Einfluss von Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauregelung am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen

Julia Kasper, Franz Simons, Fabian Belzner und  
Peter Schmitt-Heiderich

## 1 Einleitung

Um ganzjährig eine ausreichende Fahrwassertiefe für die Schifffahrt zu gewährleisten und um die Wasserkraft zu nutzen, wurden etwa 3.000 km der Bundeswasserstraßen mit Staustufen ausgebaut. Diese bestehen im Allgemeinen aus beweglichem Wehr, Schleuse und Laufwasserkraftwerk. An jeder Staustufe stellt ein manueller oder automatisierter Regler durch Ändern des Abflusses über Wehr und Kraftwerk den gewünschten Wasserstand ein. An die Abfluss- und Stauregelung (ASR) der Wasserstraßen werden verschiedene, zum Teil gegensätzliche Ansprüche gestellt: Einhaltung des Stauziels innerhalb eines festgelegten Toleranzbereichs, Verminderung von Abflussschwankungen, Hochwasserabfuhr, optimaler Wirkungsgrad des Kraftwerks sowie minimaler Verschleiß von Kraftwerksturbinen und Wehrverschlüssen.

Insbesondere während Niedrigwasserphasen sind große, messtechnisch nicht erfasste Änderungen im Zufluss problematisch für die ASR. Solche Zuflussänderungen können zu Verletzungen der Stauzieltoleranzen und verstärkten Schwankungen des Abflusses über Kraftwerk und Wehr führen. Dies tritt unter anderem bei Starkregen in urbanen Einzugsgebieten auf, da Misch- und Regenwasser in die Gewässer entlastet wird. Der Einfluss von Starkniederschlag auf die ASR wurde in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) bereits am Beispiel der Mischwasserentlastungen der Stadt Stuttgart in die Stauhaltung Hofen am Neckar untersucht (BELZNER 2011, BELZNER & SCHMITT-HEIDERICH 2012). Die dort diskutierten Maßnahmen stellen keine allgemeingültige Lösung dar, sondern eine speziell für die Stauhaltung Hofen entwickelte Strategie. Der technische Fortschritt in der Soft- und Hardwareentwicklung für die ASR (WOHLFART & GEBHARDT 2012) ermöglicht heute die Anwendung moderner und komplexerer Regelungsmethoden, zu denen die modellprädiktive Regelung (model predictive control, kurz MPC) zählt. Durch die Entwicklung eines Moduls, das ergänzend zum bestehenden automatisierten Regler agiert, stellen AMANN et al. (2013 & 2014) erstmals eine betriebsbereite MPC für den Einsatz an staugeregelten Bundeswasserstraßen zur Verfügung. Dies hat die BAW zum Anlass genommen, ihre Untersuchungen zur Starkregenproblematik fortzuführen.



Der gesamte Zufluss in die Stauhaltung umfasst nicht nur den Abfluss des Oberliegigers, sondern auch seitliche Zuflüsse wie Bäche, kleine Flüsse und Niederschlagsentlastungen aus urbanen Räumen, deren Größe meist nicht bekannt ist. Besonders wenn das Verhältnis der nicht erfassten Einleitungsmenge zum Gesamtzufluss sehr groß ist, wird die Leistungsfähigkeit des Regelungssystems überschritten. In welchem Ausmaß Starkregenereignisse ein Problem für die ASR darstellen, wird im Folgenden am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen gezeigt.

### 3 Mischwassereinleitungen in die Neckarstauhaltung Hofen

Starkregen bereitet der ASR besonders dann Schwierigkeiten, wenn das städtische Einzugsgebiet einen hohen Anteil an versiegelter Fläche sowie eine steile Topographie aufweist. Der Regen wird gefasst (Abflussbildung und Abflusskonzentration) und im Kanalnetz abtransportiert (Abflusstransformation). Aufgrund der schnellen Reaktion des städtischen Einzugsgebiets sowie der begrenzten Abflusskapazitäten muss das Kanalnetz in ein Gewässer entlastet werden. Dadurch entstehen im staugeregelten Gewässer schnell ansteigende Abflüsse, wie zum Beispiel im Fall der Neckarstauhaltung Hofen, die fast auf der gesamten Strecke innerhalb des Stuttgarter Stadtgebiets liegt (s. Abb. 2). Die Stauhaltung hat mehrere seitliche Zuflüsse, wobei der Nesenbach, der innerhalb der Stadt unterirdisch als Mischwassersammler verläuft, mit Abstand die größten Wassermengen pro Zeiteinheit einbringt.

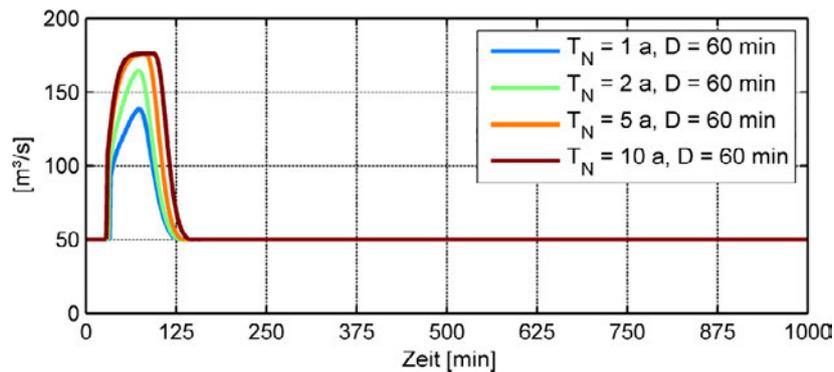


**Abb. 2:** Übersichtsplan des staugeregelten Neckars, Ausschnitt aus KRAJEWSKI (2007). Der schwarze Pfeil gibt die Fließrichtung des Neckars an und die gelbe Markierung zeigt die ungefähre Lage des Einleitungsbauwerks, durch das der Hauptsammler Nesenbach in den Neckar entlastet.

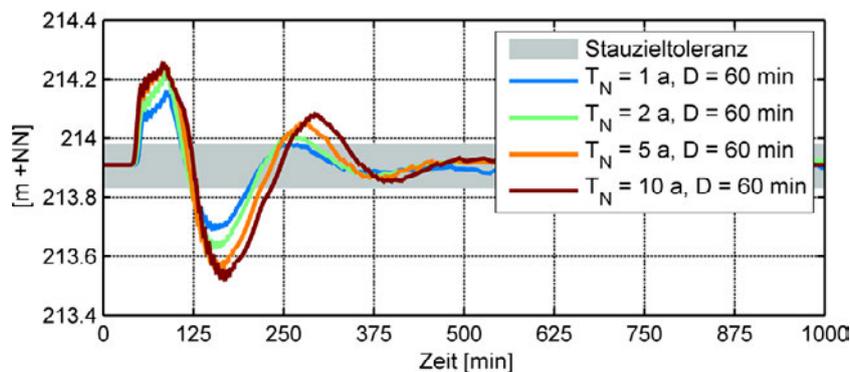
Bei Starkregen füllt das Mischwasser aus dem Hauptsammler Nesenbach zunächst ein Regenüberlaufbecken (RÜB Schwanenplatz), bevor es über ein Einleitungsbauwerk in den Neckar fließt. Dieses Einleitungsbauwerk befindet sich unmittelbar unterhalb der Staustufe Cannstatt (s. Abb. 2) und entlastet bis zu  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  an Mischwasser in den Neckar, wobei die Menge messtechnisch nicht erfasst wird. Der mittlere Abfluss des Neckars beträgt etwa  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , im Sommer sind es oftmals unter  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Demnach erhöht sich der Gesamtzufluss bei Starkregen während Niedrigwasserphasen bis auf das Siebenfache seines ursprünglichen Werts. Derartige unvorhergesehene Schwankungen können die gegenwärtig eingesetzten Regler, sowohl manuell als auch automatisiert, nicht bewältigen, ohne dass es zu großen Abweichungen vom Stauziel kommt. Für die Stauhaltung Hofen liegt das Stauziel bei  $213,83 \text{ m}+\text{NN}$  und darf nicht unterschritten werden. Der Toleranzbereich nach oben beträgt  $15 \text{ cm}$ . Weitere Details zum Neckar gibt KRAJEWSKI (2007).

BELZNER (2011) hat die Auswirkungen von Starkniederschlag auf die ASR der Stauhaltung Hofen im Rahmen einer Masterarbeit an der BAW untersucht. Im Folgenden wird eine Auswahl der Ergebnisse wiedergegeben. Zunächst wurden mit Hilfe des Starkregenkatalogs KOSTRA des Deutschen Wetterdienstes Daten für künstliche Niederschlagsereignisse in Stuttgart generiert. Um die Mischwasserentlastungen in den Neckar abzuschätzen, wurden Abflussbildung, Abflusskonzentration, Abflusstransformation und hydraulische Kontrollbauwerke wie das RÜB Schwanenplatz durch ein vereinfachtes stadthydrologisches Modell beschrieben. Für Starkregenereignisse von jeweils einer Stunde und Wiederkehrintervallen von ein bis zehn Jahren ergeben sich die in Abb. 3 gezeigten Zuflusssprünge direkt unterhalb der Staustufe Cannstatt. Der gesamte Zufluss durch Oberlieger und Einleitung ist in  $\text{m}^3/\text{s}$  gegen die Zeit seit Niederschlagsbeginn in Minuten aufgetragen. Es wurde ein konstanter Oberliegerzufluss von  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  angenommen. Die blaue Kurve beschreibt den Zufluss nach einem typischen starken Sommerregen in Stuttgart, der statistisch einmal im Jahr auftritt, eine Stunde lang andauert und eine Niederschlagsmenge von etwa  $18 \text{ l}/\text{m}^2$  aufweist.

Um den Effekt dieser Zuflussspitzen auf die ASR zu untersuchen, wurde ein eindimensionales numerisches Modell der Stauhaltung mit einer OW/Q-Regelung gekoppelt. Auf diese Weise lässt sich der zeitliche Verlauf des Wasserstands für eine gegebene Zuflusskurve simulieren. In Abb. 4 ist der Wasserstand am unteren Ende der Stauhaltung Hofen für die Zuflusskurven aus Abb. 3 gezeigt. Das typische Verhalten eines Reglers, der außerhalb seines optimalen Arbeitsbereichs operiert, ist deutlich anhand der großen Über- und Unterschwinger erkennbar. Bei den hier betrachteten Starkregenereignissen wird die Stauzieltoleranz um bis zu  $30 \text{ cm}$  unterschritten und um bis zu  $25 \text{ cm}$  überschritten. Bei Abweichungen in diesem Ausmaß kann die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gefährdet sein.



**Abb. 3:** Gesamtzufluss in die Stauhaltung Hofen bei verschiedenen Starkregenereignissen als Ergebnis des vereinfachten stadthydrologischen Modells, nach BELZNER (2011)



**Abb. 4:** Wasserstand oberhalb der Staustufe Hofen bei verschiedenen Starkregenereignissen als Ergebnis des simulierten Regelungssystems, nach BELZNER (2011)

Die Ergebnisse der Untersuchungen von BELZNER (2011) zeigen außerdem, dass die Mischwasserentlastung etwa 30 Minuten nach Niederschlagsbeginn einsetzt. Nach der Einleitung dauert es ungefähr 20 Minuten, bis der Zuflusssprung den Oberwasserpegel an der Staustufe Hofen erreicht. Selbst wenn der Zeitpunkt bekannt ist, zu dem die Entlastung einsetzt, kann man der Starkregenproblematik mit aktuell implementierten Regelungsmethoden nur eingeschränkt begegnen. Mit den Arbeiten des Instituts für Systemdynamik der Universität Stuttgart zur modellprädiktiven Regelung (AMANN et al. 2013 & 2014) steht eine neue Regelungsmethode für den Einsatz an Wasserstraßen zur Verfügung, deren Potenzial im anschließenden Abschnitt diskutiert wird.

## **4 Berücksichtigung von Starkregenereignissen in der Abfluss- und Stauregelung**

Die gegenwärtigen Herausforderungen im operationellen Betrieb der ASR liegen darin, verlässliche Zuflussprognosen vorzuhalten und Abflussschwankungen über eine Kette von Staustufen abzuschwächen. Das Ziel der BAW ist es daher, eine neue Strategie für eine stabile Abfluss- und Stauregelung zu entwickeln. Die hier vorgestellten Lösungsansätze werden seit Anfang des Jahres 2016 im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks erarbeitet.

### **4.1 Erstellung von Zuflussprognosen**

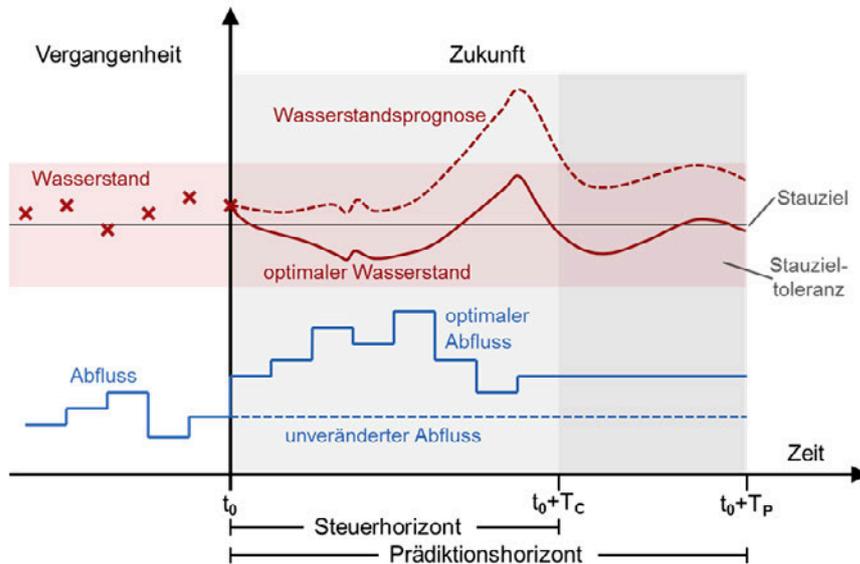
Im Betrieb muss das manuelle oder automatisierte Regelungssystem eine problematische Situation im Voraus erkennen und die richtigen Maßnahmen einleiten. Die grundlegende Idee besteht darin, dass die Regelung Informationen über den zukünftigen Verlauf des Zuflusses erhält. Sowohl für den Zufluss durch den Oberlieger als auch für seitliche Einleitungen müssen zuverlässige Prognosen erstellt werden. Da der Oberliegerzufluss anhand der Abflüsse an oberstrom liegenden Staustufen vorhergesagt werden kann, konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Vorhersage von Anfangszeitpunkt, Dauer und Menge der Entlastung nach einem Starkregenereignis.

In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) soll eine Pilotstudie für die Stauhaltung Hofen durchgeführt werden. Der DWD wird dazu Daten aus dem sogenannten Nowcasting, d. h. aus statistischen Extrapolationen von Radarbeobachtungen, sowie aus hochauflösenden Ensembleprognosen für das urbane Einzugsgebiet des Nesenbachs bereitstellen. Mit Hilfe eines hydrologischen Modells lassen sich auf diese Weise Zuflussprognosen für die ASR gewinnen. Aussagen über die Genauigkeit dieses operationellen Vorhersagesystems können anschließend mithilfe von kalibrierten Niederschlagsmessungen der Radarfotogrammetrie sowie Wasserstands- und Abflusswerten der Staustufe Hofen getroffen werden.

### **4.2 Anwendung der modellprädiktiven Regelung**

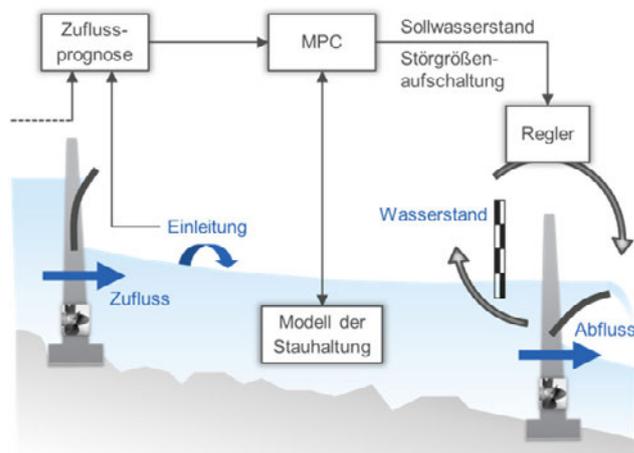
Um vorhandene Zuflussprognosen effektiv zu nutzen, wird das Konzept der modellprädiktiven Regelung (MPC) angewendet. Das charakteristische Merkmal der MPC liegt in einem internen Modell der Stauhaltung. Mit dessen Hilfe wird, bei als konstant angenommenem Abfluss, aus der Zuflussprognose eine Wasserstandsprognose berechnet (s. Abb. 5).

Aus mathematisch formulierten Kriterien für die ASR wird anschließend anhand eines Optimierungsverfahrens der bestmögliche Verlauf von Abfluss und Wasserstand ermittelt. Die Arbeitsschritte der Prädiktion und der Optimierung werden bei jedem Abtastintervall des Reglers durchgeführt. Aus dem optimalen Abfluss- und Wasserstandsverlauf werden dabei jeweils nur die Werte des nächsten Zeitschritts für die Steuerung von Wehr und Kraftwerk verwendet. Auf diese Art berücksichtigt die Regelung immer die aktuellste Zuflussprognose. Weiterführende Erklärungen zur MPC finden sich in AMANN et al. (2013) und in einschlägiger Fachliteratur wie beispielsweise DITTMAR & PFEIFFER (2004).



**Abb. 5:** Grundprinzip der modellprädiktiven Regelung

Die Besonderheit bei der Anwendung auf Wasserstraßen ist, dass die MPC in Form einer Störgrößenaufschaltung umgesetzt wird und nicht Teil des Regelkreises ist (s. Abb. 6). So können bestehende Regelungsstrukturen erhalten bleiben. Die MPC gibt in jedem Zeitschritt die Werte für Sollwasserstand und Sollabfluss an die lokal installierte Regelung weiter. Der Regler wird nur dann aktiv, falls sich Ist- und Sollwasserstand unterscheiden, und gleicht daher die Fehler der Störgrößenaufschaltung aus. Sollte die MPC ausfallen, etwa wegen fehlender Messwerte, schaltet das System auf die OW/Q-Regelung um, so dass die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs weiterhin gewährleistet wird.



**Abb. 6:** Abfluss- und Stauregelung an Wasserstraßen, erweitert um eine MPC-basierte Störgrößenaufschaltung

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Starkregen in städtischen Einzugsgebieten kann zu Problemen für die Abfluss- und Stauregelung (ASR) führen, wenn die kurzzeitig eingeleitete Misch- oder Regenwassermenge ein Vielfaches des aktuellen Gewässerabflusses beträgt. Insbesondere bei Niedrigwasser bewirken diese Einleitungen größere Stauzielverletzungen und Abflussschwankungen in den staueregelten Wasserstraßen. Diese Folgen lassen sich mit den aktuell eingesetzten Reglern nicht zufriedenstellend bewältigen. Eine vielversprechende Lösungsmöglichkeit stellt jedoch das Konzept der modellprädiktiven Regelung (MPC) dar. Die MPC soll an Wasserstraßen in Form einer Störgrößenaufschaltung umgesetzt werden und die aus Niederschlagsprognosen gewonnenen Zuflussvorhersagen berücksichtigen. Eine Stauhaltung kann mittels MPC auf ein bevorstehendes Starkregenereignis vorbereitet werden, indem der Wasserstand frühzeitig abgesenkt wird. Gleichzeitig dient die MPC der Vergleichmäßigung des Abflusses.

Die Bundesanstalt für Wasserbau hat mit dem Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart und mit dem Deutschen Wetterdienst qualifizierte Partner, um die hier vorgestellte Regelungsstrategie bestmöglich umzusetzen. Im Rahmen des Expertennetzwerks des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur soll eine Pilotstudie an der Neckarstauhaltung Hofen in Stuttgart zeigen, inwieweit die Verknüpfung von MPC und operationellem Vorhersagesystem die Auswirkungen von Starkniederschlag auf die ASR vermindern kann. Darüber hinaus sollen mögliche Fehler abgeschätzt werden, die sich aus Niederschlagsvorhersagen, Niederschlags-Abfluss-Modell und internem Stauhaltungsmodell der MPC ergeben.

## Literatur

- AMANN, K., E. ARNOLD, O. SAWODNY (2013): An inversion based model-predictive feed-forward discharge controller for impounded rivers. International Workshop on Multi-dimensional (nD) Systems, pp. 9-11, Erlangen, Germany
- AMANN, K., E. ARNOLD, O. SAWODNY (2014): Comparison of model based feed-forward control strategies for impounded rivers. European Control Conference (ECC), pp. 1361-1366, Strasbourg, France
- BELZNER, F. (2011): Einfluss der Mischwasserentlastung der Stadt Stuttgart bei sommerlichen Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauzielregelung am Neckar. Unveröffentlichte Masterarbeit, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
- BELZNER, F., P. SCHMITT-HEIDERICH (2012): Einfluss urbaner Einzugsgebiete auf die automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung. Bundesanstalt für Wasserbau, Innovation mit Tradition – Hydraulischer Entwurf und Betrieb von Wasserbauwerken, Kolloquium am 4./5. Juli 2012, S. 93-98, Karlsruhe
- BMVI / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): BMVI-Expertennetzwerk Wissen – Können – Handeln. <http://www.bmvi-expertennetzwerk.de>, abgerufen am 08. November 2016.
- DITTMAR, R., B.-M. PFEIFFER (2004): Modellbasierte prädiktive Regelung – Eine Einführung für Ingenieure. Oldenbourg Verlag, München, Wien

KRAJEWSKI, C. (2007): Bundeswasserstraße Neckar – Auszug aus dem Kompendium der WSD Südwest vom Juni 2007, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest, Mainz

SCHMITT-HEIDERICH, P. (2012): Motivation zum FuE-Vorhaben „Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)“. Bundesanstalt für Wasserbau, BAWMitteilungen Nr. 96, S. 7-14, Karlsruhe

WOHLFART, S., M. GEBHARDT (2012): Automatisierung der Abfluss- und Stauzielregelung durch Model-Based Design und automatische Codegenerierung. Bundesanstalt für Wasserbau, BAWMitteilungen Nr. 96, S. 111-121, Karlsruhe

**Kontakt:**

**Julia Kasper**

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstraße 17

76187 Karlsruhe

Tel.: 0721/ 9726 5165

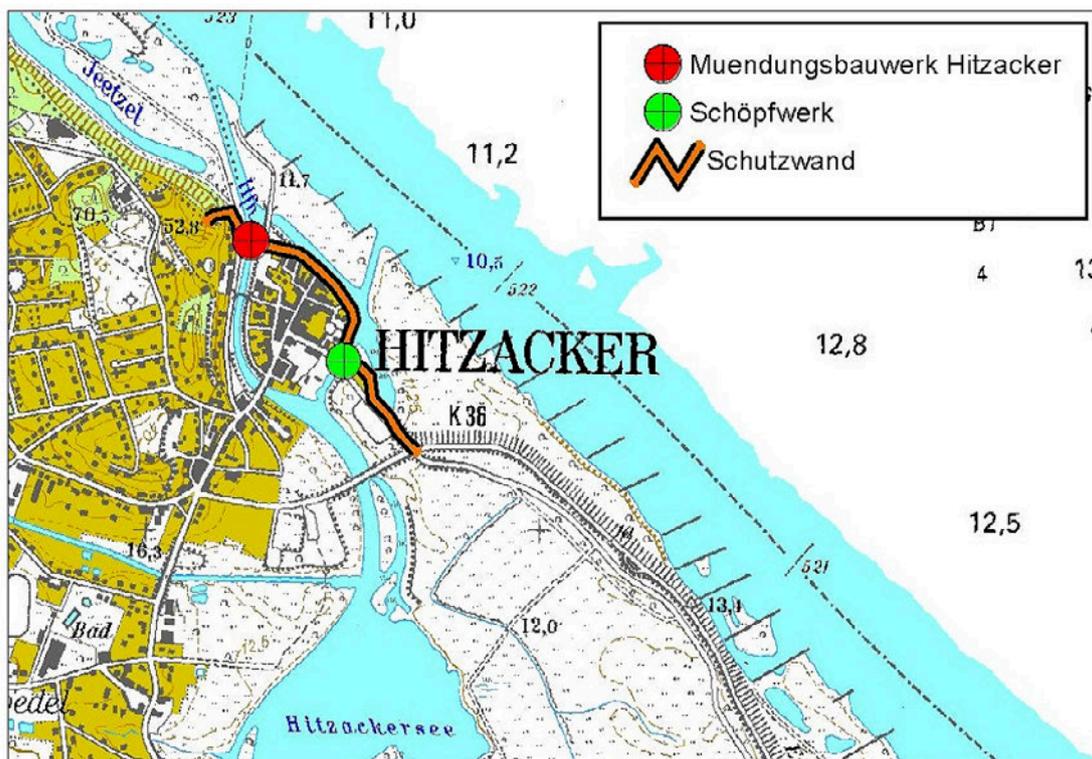
E-Mail: [julia.kasper@baw.de](mailto:julia.kasper@baw.de)

# Steuerungsmodell Jeetzel / Hitzacker

Joachim Steinrücke

## 1 Veranlassung

Die Jeetzel mündet bei Hitzacker in die Elbe. Bedingt durch hohe Elbwasserstände kam es immer wieder zu großräumigen Überschwemmungen, insbesondere im Mündungsbereich. Da die im Hochwasserfall resultierenden Wasserspiegellagen in der Elbe durch Maßnahmen an der Jeetzel praktisch nicht beeinflusst werden können, wurden Hochwasserschutzmaßnahmen gegen hohe Elbwasserstände entwickelt und zwischen 2006 und 2008 umgesetzt.



**Abb. 1:** Bausteine der Hochwasserschutzanlage Hitzacker

Neben festen und mobilen Hochwasserschutzwänden besteht die Schutzanlage auch aus einem in der Jeetzelmündung gelegenen verschließbaren Mündungsbauwerk. Da im Falle einer Sperrung der Jeetzel die Abflussmöglichkeit genommen ist, wurde ein Schöpfwerk, das das Jeetzelwasser in die Elbe pumpt, realisiert. Die wesentlichen Bausteine der Schutzanlage sind in Abb. 1 dargestellt.

Zum effektiven und sicheren Betrieb der Hochwasserschutzeinrichtung war gemäß Planfeststellungsbeschluss mit der Inbetriebnahme auch ein Steuerungsmodell zu installieren.

## **2 Steuerungsmodell**

Zur Gewährleistung eines effektiven Hochwasserschutzes durch einen wirksamen Einsatz der Schutzeinrichtungen in Hitzacker und der sonstigen Bauwerke wurde die ProAqua Ingenieurgesellschaft mit der Erstellung eines Steuerungsmodells durch den Jeetzeldeichverband beauftragt.

### **2.1 Anforderungen und Ziele**

Vor der Erstellung des Modells wurden die Anforderungen und Ziele an das operative Steuerungsmodell fixiert. Das Steuerungsmodell Jeetzel soll primär dazu beitragen, die Hochwasserschutzbauwerke in Hitzacker effektiv einzusetzen. Es soll schädliche Überflutungen im Niederungsbereich vermeiden bzw. mindern helfen. Hierzu soll das System neben der Modellierung aktueller und geplanter Bauwerkssteuerungen eigenständig eine zielgerichtete Steuerung der Bauwerke ermitteln.

Der Einsatz des Steuerungsmodells ist für alle Sperrfälle vorgesehen, im Falle von Eigenhochwasser soll es auch ohne Sperrung einsetzbar sein.

Das Steuerungsmodell soll:

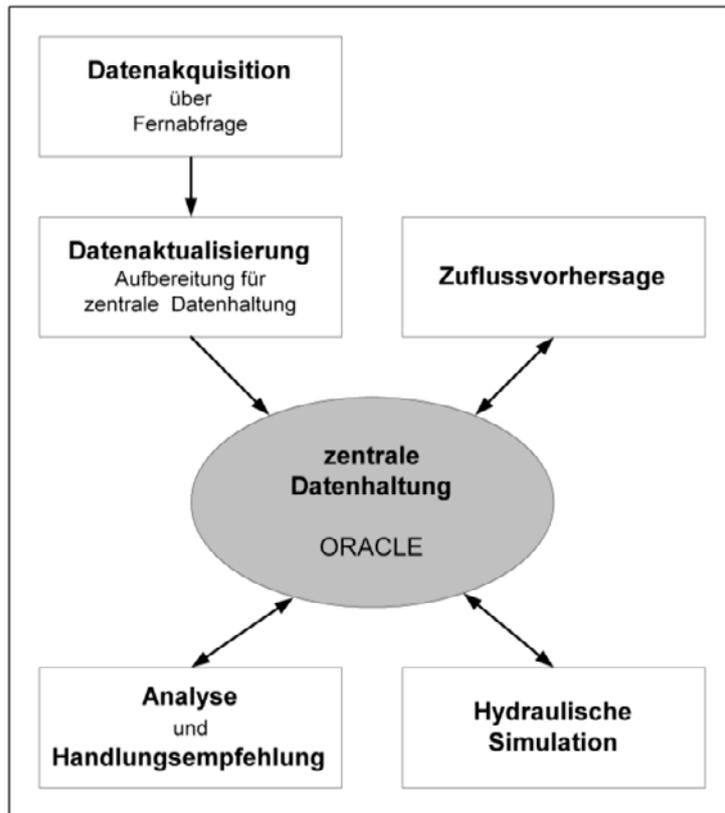
- > zuverlässig arbeiten
- > „gute“ Vorhersagen liefern
- > Entscheidungshilfen auch zum operativen Eingriff bereitstellen
- > Wirksamkeit von Eingriffen vorhersagen
- > Variantenrechnungen ermöglichen
- > einfach zu bedienen sein
- > flexibel verwendbar sein
- > Ergebnisse transparent darstellen
- > Daten und Ergebnisse zur Beweissicherung archivieren

Der Fokus des Modells, insbesondere der Steuerungsempfehlung, liegt auf dem Einsatz im Hochwasserfall. Berechnungen mittlerer und niedriger Abflüsse sind ebenfalls möglich.

### **2.2 Aufbau des Steuerungsmodells**

Auf Basis der Anforderungen wurde das Konzept erstellt. Neben umfassenden Aufgaben der Datenakquisition und -aufbereitung, der Nutzerführung und Datenhaltung war auch der Einsatz von Modellen zu konzipieren. Hier war insbesondere die automatische Berücksichtigung der Onlinedaten zu vorzusehen.

Das Steuerungsmodell wurde modular aufgebaut, das Zusammenwirken der wesentlichen Komponenten ist in Abb. 2 dargestellt, die Komponenten sind nachfolgend kurz erläutert.



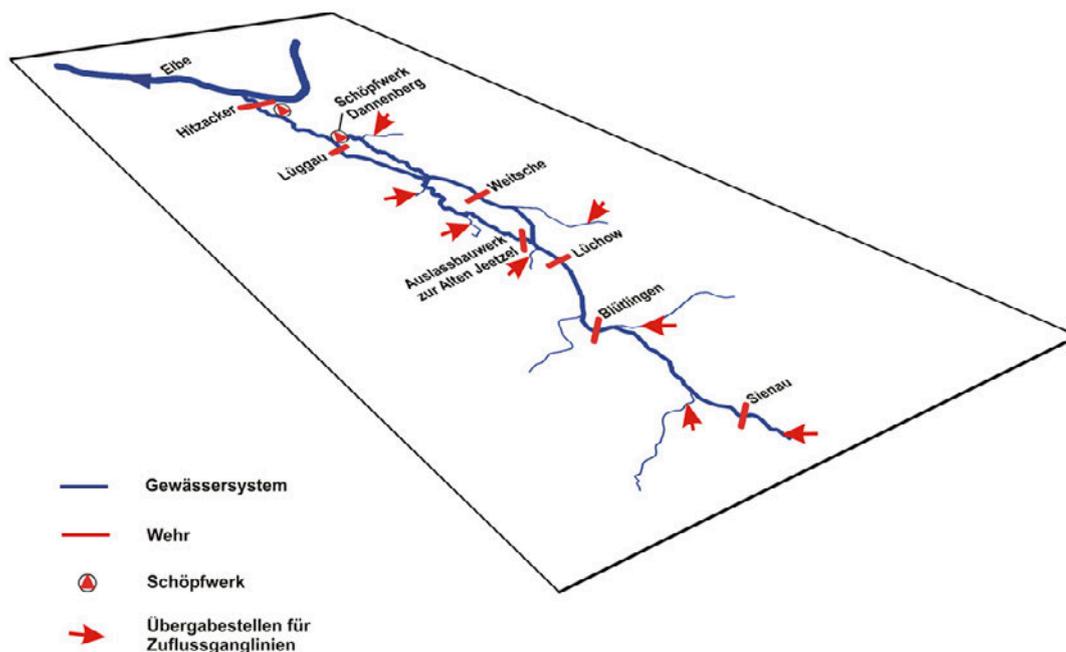
**Abb. 2:** Zusammenspiel der Komponenten des Steuerungsmodells Jeetzel

Kurzbeschreibung der Komponenten:

- > **Datenakquisition**  
Abruf und Bereitstellung aller erforderlichen zeitvarianten Größen über FTP-Server und Modemleitungen. Insgesamt werden etwa 100 Prozessgrößen verwendet (Das Modul läuft kontinuierlich, unabhängig vom Steuerungsmodell).
- > **Datenaktualisierung**  
Aufbereitung der zur Verfügung gestellten/abgerufenen Datengrundlage, modellgerechte Aufbereitung und Aktualisierung der Daten in der zentralen Datenhaltung
- > **Zuflussvorhersage**  
Mittels dieser Komponente werden Abflussganglinien vorhergesagt und die erforderlichen Zuflusszeitreihen für die hydraulische Simulation erstellt.
- > **Hydraulische Simulation**  
Die Hydraulik deckt die Jeetzelniederung bis Salzwedel sowie einige größere Nebengewässer ab. Hier werden die Wehre, Schöpfwerke, der Abschlag in die Alte Jeetzel und das Sperrwerk berücksichtigt. Im Rahmen der hydraulischen Modellierung werden auch operative Eingriffe simuliert.
- > **Analyse und Handlungsempfehlung**  
Die Berechnungsergebnisse werden analysiert und hierauf aufbauend Handlungsempfehlungen abgeleitet. Basierend auf der Handlungsempfehlung kann automatisch eine hydraulische Simulation durchgeführt werden, um die Wirksamkeit zu überprüfen.
- > **Archivierung/Datenhaltung**  
Zur Datenhaltung dient eine Oracle-Datenbank.

### 3 Numerische Modelle

Der modelltechnische Kern des Steuerungssystems besteht aus numerischen Modellen. Ein Modell simuliert die Abflussprozesse im Einzugsgebiet und den Nebengewässern. Mit diesem Modell werden Zuflussganglinien berechnet, die dem operativen hydraulischen Modell als Eingang dienen, in Abb. 3 ist die Verzahnung der Modelle schematisch dargestellt.



**Abb. 3:** Schematische Darstellung des Modellansatzes

#### 3.1 Zuflussvorhersage

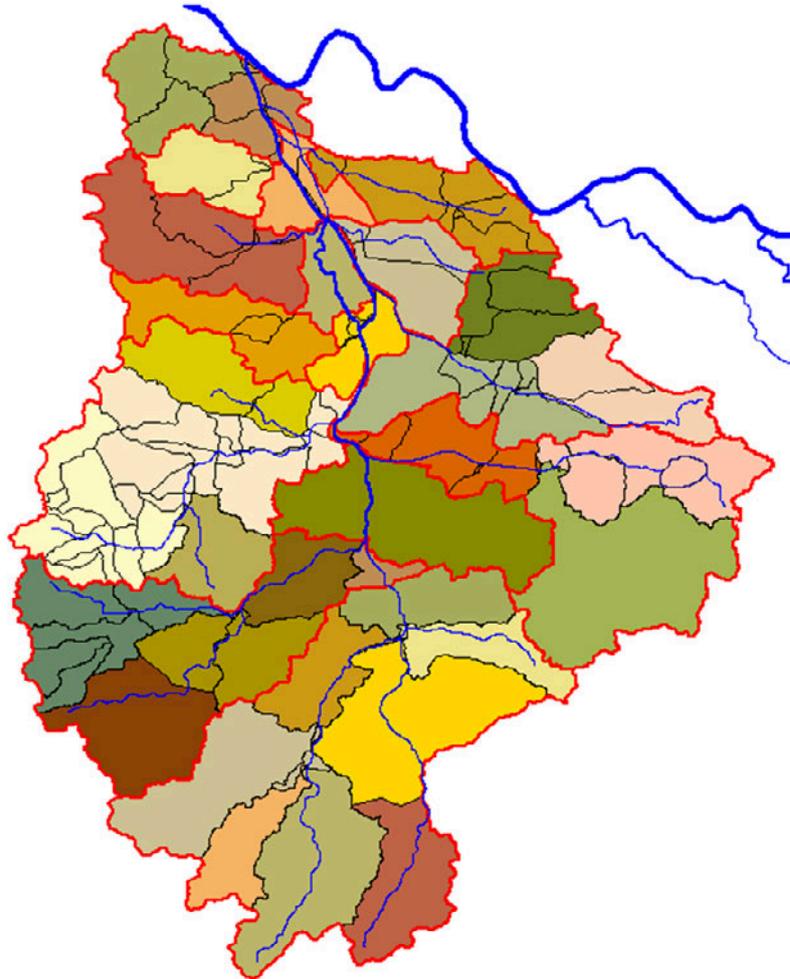
Das Modell der Zuflussvorhersage berechnet – entgegen seinem Namen – nicht nur Zuflüsse in der Zukunft, sondern auch Zuflüsse für beliebige Zeiträume. Mit Hilfe des Modells werden die wasserwirtschaftlichen Verhältnisse im gesamten Einzugsgebiet simuliert. Es dient dazu, für das hydraulische Modell Zuflusszeitreihen bereitzustellen.

Im Steuerungsmodell sind für die Berechnung der Zuflüsse zwei alternativ zu verwendende Modelle implementiert, ein Niederschlag-basiertes und ein Pegel-basiertes. Hinsichtlich der Vorhersagegüte und des vorhersagbaren Zeitraums bietet der Niederschlag-basierte Ansatz deutliche Vorteile, insbesondere dann, wenn auch vorhergesagte Niederschläge berücksichtigt werden.

Ungeachtet der Güte und Belastbarkeit der Vorhersagen wurden zwei Modelle gewählt, um ein möglichst robustes, auf unterschiedlichen Eingangsdaten basierendes Gesamtsystem nutzen zu können. So weit möglich, wird im operativen Einsatz das Niederschlag-basierte Modell verwendet.

##### 3.1.1 Niederschlag-basiertes Vorhersagemodell

Zum Einsatz kommt das deterministische, durch ProAqua entwickelte Niederschlag-Abfluss-Modell (N-A-Modell) ProVos. Mit diesem Modell wird das gesamte Niederschlag-Abfluss-Geschehen im 1.920 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet simuliert (siehe Abb. 4).



**Abb. 4:** Einzugsgebiet der Jettel einschließlich der größeren Teileinzugsgebiete

ProVos ist ein Kontinuum-Modell, es bildet die komplette Wasserbilanz unter Berücksichtigung des Bodenwasserhaushaltes, der Transpiration, Evaporation etc. inkl. der schneehydrologischen Aspekte ab. Neben den Prozessen auf bzw. in der Fläche werden alle weiteren wasserwirtschaftlich relevanten Phänomene wie Wellenablauf, die Wirkung von Sonderbauwerken und Speichern hydrologisch abgebildet. Das N-A-Modell nimmt eine Transformierung der Eingangsgrößen (Niederschlag, Verdunstung etc.) vor und liefert eine zeitliche Darstellung der Abflüsse im Gewässer.

Aufgrund des Kontinuum-Charakters ist das Modell geeignet, sowohl langfristige als auch kurzfristige Zeiträume abzubilden. Für den operativen Einsatz werden in der Regel nur wenige Tage simuliert, die sensitiven Startzustände werden automatisch aus vorherigen Simulationen übernommen. Da die Startzustände nicht zwingend korrekt sind, ist auch eine einfache automatische Rückkopplung mit Messwerten möglich.

Die Simulation erfolgt in diskreten Zeitschritten von 60 Minuten, als Eingang dienen die aufbereiteten Daten aus Niederschlagsradar und vorhergesagten Niederschlägen. Verwendet werden hierzu die DWD-Produkte RADOLAN und LME, die automatisch via FTP vom DWD-Server heruntergeladen und modellgerecht aufbereitet werden.

### 3.1.2 Pegel-basiertes Vorhersagemodell

Der Pegel-basierten Vorhersage liegt das Prinzip zugrunde, auf Basis aktueller Messwerte die in naher Zukunft zu erwartenden Messwerte vorherzusagen. Zur Erstellung einer Vorhersage wird das durch ProAqua entwickelte Programm ProVos-P eingesetzt, das unter Verwendung der Messwerte (Zeitreihe) in Anlehnung an ARIMA-Modelle (Auto-Regressive Integrated Moving Average-Modell) arbeitet.

ProVos-P ist ein Multiples (Auto)Regressionsmodell. Auf Basis der Eingangszeitreihe werden mit unterschiedlichen Transformationen „neue“ unabhängige Zeitreihen erstellt und anschließend statistisch ausgewertet.

Die Festlegung der Transformationsregeln sowie die Vorbereitung und Auswahl der Stichproben erfolgte im Rahmen der Modellerstellung, als deren Ergebnis ein Modelldatensatz sowie statistisch ermittelte Parameter vorliegen. Unter Verwendung des Parameterdatensatzes, der Transformationsregeln und einer Zeitreihe können Online-Vorhersagen erstellt werden. Die Vorhersagegenauigkeit nimmt – wie bei jedem Vorhersagemodell – mit zunehmender Vorhersagedauer ab. Im Rahmen der Modellerstellung wurde eine maximale Vorhersagedauer festgelegt und hierauf basierend die Parameter etc. ermittelt.

### 3.2 Hydraulisches Modell

Für die hydraulische Simulation wird der Rechenkern des instationären 1D-Hydraulikmodells HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center, Center of Expertise for the U.S. Army Corps of Engineers) verwendet. Das Modell bildet die hydraulischen Verhältnisse in der Jeetzel von Salzwedel bis zur Mündung in die Elbe und in der Alten Jeetzel sowie Teile des Jamelner Mühlenbaches, des Luciekanals und des Lübelner Mühlenbaches ab.

Die Unterwasserrandbedingung, der Wasserstand in der Elbe, wird auf Basis der automatisch erfassten und aufbereiteten Messwerte sowie der Hochwasservorhersagezentrale Elbe (WSA Magdeburg) angesetzt.

Die Gesamtlänge des hydraulischen Modells umfasst rund 77 km mit ca. 730 Querprofilen und 35 Sonderbauwerken. Die Pumpen wurden mit entsprechender Pumpenganglinie und wasserstandsgeregelter Steuerung abgebildet. Die Wehranlagen in Lüchow, Lüggau, Blütlingen und Weitsche wurden als steuerbare Bauwerke mit überströmter variabler Wehroberkante integriert. Der Abzweig in die Alte Jeetzel und die Stauanlage in Sienau wurden über regelbare Schützbauwerke abgebildet. In Hitzacker wurden sowohl das Sielbauwerk als auch das Schütz im Schöpfwerk berücksichtigt. Aufgrund der Komplexität wurde das Siel- und Schöpfwerk in Dannenberg regelbasiert integriert.

Die zeitvariante Steuerung der Bauwerke wird über Messwerte erfasst, diese werden online abgerufen und automatisch im Modell als zeitvariante Größe verwendet. Das hydraulische Modell „fährt“ somit die historischen und aktuellen Bedingungen nach und kann unter Ansatz vorhergesagter Zuflüsse und der geplanten Steuerung die zu erwartenden hydraulischen Verhältnisse berechnen.

Trotz der Komplexität des Steuerungsmodells ist es äußerst performant, der gesamte Zyklus von Datenakquisition bis zur Handlungsempfehlung einschließlich eines hydraulischen Wirksamkeitsnachweises benötigt weniger als 10 Minuten. Die Simulation einer Variante inklusive Pre- und Postprocessing erfolgt in rund 2 Minuten. Die kurzen Rechenzeiten ermöglichen somit auch in zeitkritischen Phasen des operativen Einsatzes die Erarbeitung zielführender Lösungen.

## 4 Fazit

Das für den operativen Einsatz erstellte Steuerungsmodell wurde 2008 in Betrieb genommen. Bei ersten Einsätzen gemachte Erfahrungen flossen in die Weiterentwicklung ein, sie beschränkten sich primär auf Modifikationen der Nutzerführung und die Einbindung weiterer Betriebspunkte.

Trotz der sehr einfachen Bedienung des Steuerungsmodells ist sowohl ein vertieftes Verständnis für numerische Modellierungen, eine Abstraktionsfähigkeit in Bezug auf Planspiele und Variantenrechnungen als auch gute Ortskenntnisse erforderlich. Aus diesem Grund führte ProAqua mehrere Schulungen zum effizienten und sicheren Umgang mit dem Steuerungsmodell durch. Aufgrund personeller Veränderungen und einem mehrfachen Wechsel der Zuständigkeiten beim Modellbetreiber wurde der operative Betrieb 2011 ProAqua übertragen.

Seit der Inbetriebnahme hat sich das Steuerungsmodell bereits bei mehreren Hochwasserereignissen erfolgreich bewährt.

## Literatur

- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2004): Wasserstands- und Abflussvorhersage in grenzüberschreitenden Flussgebieten, Stand und Weiterentwicklung von Vorhersagesystemen. Kolloquium am 9. Dezember 2003, Koblenz. Veranstaltungen 6/2004, 92 S.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2005): Projekt Radolan. Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). <<http://www.dwd.de>>
- DWA Themen (07/2009) „Modelle zur operationellen Hochwasservorhersage“. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.- ISBN, 978-3-940173-72-0
- EINFALT, T. & M. JESSEN (2002): Radargestützte Abschätzung der Wiederkehrzeiten von Niederschlag in städtischen Gebieten. In: Wasserwirtschaft 10/2002
- GELHOET, M. (2004): Eine mehrstufige Entscheidungsunterstützung durch Active Data Warehouses. IMU Forschungskolloquium 2004
- ProAqua GmbH (2009): Handbuch Steuerungsmodell Jeetzel. Unveröffentlicht
- ProAqua GmbH (2011): Niederschlag-Abfluss-Modell ProVos. Anwenderhandbuch. Unveröffentlicht
- STEINRÜCKE, J., R. WEIBHAUPT, H. VOLLMERDING (2005): Ein DSS für den Betreiber des Emssperrwerkes. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 10.05

### Kontakt:

**M.S. Dipl.-Ing. J. Steinrücke**

ProAqua Ingenieurgesellschaft mbH

Turpinstraße 19

52066 Aachen

Tel.: 0241/ 94992 10

E-Mail: [jsteinruecke@proaqua-gmbh.de](mailto:jsteinruecke@proaqua-gmbh.de)

# Schlussbemerkungen

Thomas Maurer

Das Kolloquium zur „Modellierung aktueller wasserwirtschaftlicher Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen“ und die zugehörigen Beiträge verdeutlichen eindrucksvoll den Facettenreichtum der Wassermengenbewirtschaftung. Schon die einleitenden Impulsvorträge machten bewusst, dass wir nahezu überall die Ressource Wasser in mannigfaltiger Hinsicht nutzen und dazu sektor- und regionsspezifische Systeme entwickeln und einsetzen, die uns weitgehende Kontrolle über die Bewirtschaftung geben. Daten der Systeme sowie ihrer Nutzung sind die Grundlage für Modelle, die wir wiederum benötigen, um die Systeme bestmöglich zu steuern (kurzfristige Perspektive) und unseren Bedürfnissen und Werten gemäß weiterzuentwickeln (langfristige Perspektive). Die Themen Daten und Modelle strukturierten die Veranstaltung, wenn auch die Wechselbeziehungen zwischen beiden so groß sind, dass das eine kaum ohne das andere behandelt werden kann.

Übergeordnetes Fazit aus allen Beiträgen ist die grundlegende Bedeutung ausreichender Daten für die Modellierung und das Management der Anlagen zur Wasserbewirtschaftung. Ein geflügeltes Wort lautet: „If you can't measure it, you can't manage it.“ und man möchte hinzufügen: „...and you can't model it“. Das trifft im Kontext dieses Kolloquiums in ganz besonderem Maß auf die Wassernutzungsdaten zu.

Wie dargestellt wurde, setzt sich die gesamte Unsicherheit eines Modells aus zwei sich mit der Modellkomplexität gegenläufig entwickelnden Unsicherheiten zusammen, der strukturellen Unsicherheit infolge unzureichenden Prozessverständnisses und der Daten- und Parameterunsicherheit aufgrund fehlender die Systeme charakterisierender Beobachtungs- und Steuerungsdaten. Wasserbewirtschaftungssysteme sind i. d. R. Mischformen aus künstlichen und natürlichen Systemen in unterschiedlichen Anteilen. Künstliche Systeme sind im Vergleich zu natürlichen Systemen von geringerer Heterogenität. Da sie von Menschenhand geplant und betrieben werden, könnten alle sie charakterisierenden Daten prinzipiell bekannt sein und damit ihren Beitrag zur Reduktion der Gesamtunsicherheit eines Wasserbewirtschaftungssystems leisten.

Modellbildung hat einen hohen integrativen Charakter und trägt dazu bei, Erfahrungswissen zu objektivieren, es anzugleichen sowie es transparent und über Raum und Zeit hinweg kommunizierbar zu machen. Modelle und – wichtiger noch – zugehörige Haltungen der zugrundeliegenden Daten sind daher ein essentielles Werkzeug des technischen Wissensmanagements, dem gerade in heutigen Zeiten verringerter Personalressourcen und erhöhter Personalfuktuation bei gleichzeitig höheren Ansprüchen an die Zuverlässigkeit und die Nachhaltigkeit der bewirtschafteten Systeme zunehmende Bedeutung zukommt.

Aus gleichem Grund müssen wir die heute noch häufig erforderliche mühsame Detektivarbeit der Datenrecherche hinter uns lassen und die Systeme hin entwickeln zu etwas, dass man in Anlehnung an den Begriff „Industrie 4.0“, der die Verzahnung der industriellen Produktion mit moderner Informations- und Kommunikationstechnik adressiert, mit dem Begriff „Wasserwirtschaft 4.0“ bezeichnen könnte und der als Leitidee der zukünftigen Entwicklung integrierter Modell- und Datenwelten dienen kann.

**Kontakt:**

**Dr.-Ing. Thomas Maurer**

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261/ 1306 5242

E-Mail: [thomas.maurer@bafg.de](mailto:thomas.maurer@bafg.de)

## **In der Reihe BfG-Veranstaltungen sind bisher u. a. erschienen:**

- 1/2010 Flusssysteme in Raum und Zeit
- 2/2010 Berücksichtigung verkehrs- und bautechnischer Emissionen und Immissionen in Umweltverträglichkeitsprüfungen
- 3/2010 Pathogene Vibrionen in der marinen Umwelt
- 4/2010 Riskobewertung stofflicher Belastungen
- 5/2010 Screeningverfahren zur Erfassung endokriner Wirkungen in der aquatischen Umwelt
  
- 1/2011 Erfassung und Bewertung des hydromorphologischen Zustands in Wasserstraßen
- 2/2011 Umweltauswirkungen von Wasserinjektionsbaggerungen
- 3/2011 Zeitgemäße Erfassung und Bereitstellung von Geobasisdaten für die WSV
- 4/2011 EurAqua Symposium Impact of climate change on water resources – 200 years hydrology in Europe – a European perspective in a changing world
- 5/2011 Schadstoffdynamik in Flussgebieten – Ursachen, Wirkungen und Konsequenzen stofflicher Veränderungen in Raum und Zeit
  
- 1/2012 Partikuläre Stoffströme in Flusseinzugsgebieten
- 2/2012 Überregionale Wasserbewirtschaftung – Entwicklung und Einsatz eines Informationssystems und verschiedener Modelle
- 3/2012 Dynamik des Sedimenthaushaltes von Wasserstraßen
- 4/2012 Pathogenic *Vibrio* spp. in Northern European Waters
- 5/2012 Baumaterialien und Oberflächengewässer
- 6/2012 Hydro-ökologische Modellierungen und ihre Anwendungen
- 7/2012 Monitoring, Funktionskontrollen und Qualitätssicherung an Fischaufstiegsanlagen. 2. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen
  
- 1/2013 Wissen was war ... – Rückblick auf hydrologische Extreme
- 2/2013 Die Bundeswasserstraßen im Blickfeld ökologischer Zielsetzungen gemäß WRRL – Erreichtes und Erreichbares
- 3/2013 Geomorphologische Prozesse unserer Flussgebiete
- 4/2013 FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG
- 5/2013 Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung
- 6/2013 Die Zukunft des Wasserhaushaltes im Elbeinzugsgebiet / Budoucnost vod-ního režimu v povodí Labe
- 7/2013 Bioakkumulation in aquatischen Systemen: Methoden, Monitoring, Bewertung
- 8/2013 Geodätische Arbeiten für Bundeswasserstraßen
  
- 1/2014 Artenschutz in der Praxis – Erfahrungen mit Ersatzquartieren und der Umsiedlung von streng geschützten Arten
- 2/2014 Ästuare und Küstengewässer der Nordsee
- 3/2014 Schadstoffe in Bundeswasserstraßen – Nutzergerechte Verfügbarkeit von Informationen
  
- 1/2015 Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Maßnahmen an Bundeswasserstraßen. 4. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen
- 2/2015 Wasserstraßenbezogene geodätische Anwendungen und Produkte der Fernerkundung
- 3/2015 Ökosystemleistungen – Herausforderungen und Chancen im Management von Fließgewässern
- 4/2015 Qualitativ-gewässerkundliche Aspekte der WSV-Arbeit
  
- 1/2016 Sedimentbilanzen in Flussgebieten – von der Quelle bis zur Mündung
  
- 1/2017 Geodätische Beiträge zum Systemverständnis für Bundeswasserstraßen und sonstige Gewässer
- 2/2017 Korrosionsschutz im Stahlwasserbau – Zulassung, Einsatz, Umweltaspekte
- 3/2017 Statistische Methoden in der hydrologischen Vorhersagepraxis und deren Nutzen
- 4/2017 Radioaktivität in Forschung und Umwelt – 60 Jahre Radiologie in der Bundesanstalt für Gewässerkunde