

3/2018

Veranstaltungen

Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre
hydraulische Modellierung in der BfG

12./13. Juni 2018 in Koblenz

Koblenz, Juni 2018

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
Internet: <http://www.bafg.de>

Druck: Druckerei des BMVI

ISSN 1866 – 220X

DOI: 10.5675/BfG_Veranst_2018.3

Zitiervorschlag:

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG. Kolloquium am 12./13. Juni 2018 in Koblenz. – Veranstaltungen 3/2018, Koblenz, Juni 2018, 152 S.;
DOI: 10.5675/BfG_Veranst_2018.3

Inhalt

Vorwort.....	4
Abflussmodellierungen in der BfG von 1968 bis 2006	5
Heinz Engel	
Abflussmodellierung in der BfG heute.....	17
Thomas Maurer	
Fließgewässermodellierung für Bundeswasserstraßen im Dienst der Gewässerkunde	27
Norbert Busch	
2D-Modellierung zur Überprüfung und Verbesserung von Abflusskurven an der Weser	42
Alpaslan Yörük	
Analyse und Optimierung des Elbe-Havel-Systems mithilfe von 2D-Modellierung	52
Markus Promny, Norbert Busch, Andrea Gleim, Matthias Hammer und Rita Ley	
Einsatz hydraulischer Modelle zur Verbesserung hydrologischer Grundlagen: Homogenisierung der langen HQ-Reihen (1890-2013) für Pegel der Elbe	61
Marcus Hatz	
Bereitstellung hydrologischer Grundlagen – Fachdienst FLYS der BfG.....	71
Norbert Busch	
Die Bedeutung überregionaler Wirkungsnachweise im Nationalen Hochwasserschutzprogramm (NHWSP)	84
Cindy Mathan	
Einsatz von Modellsystemen im Donaugebiet – Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm (FuE-NHWSP)	92
Carina Schuh und Martin Schmid	
Aspekte hydraulischer Modellierung am Rhein in Nordrhein-Westfalen	101
Bernd Mehlig	
Hydraulische Modellierung bei der Wasserstandsvorhersage für Bundeswasserstraßen.....	108
Dennis Meißner und Silke Rademacher	
Modellierung im Binnenverkehrswasserbau – Routine oder Herausforderung?	119
Andreas Schmidt	
Hydraulische Modellierung – eine wesentliche Grundlage für die erfolgreiche integrierte Gewässerentwicklung	133
Peter Horchler und Andreas Anlauf	
Die Musik und das Wasser – ein kurzer musikgeschichtlicher Ausschnitt.....	143
Jens Schawaller	

Vorwort

Die großräumige hydraulische Abflussmodellierung der Bundeswasserstraßen gehört zu den Kernkompetenzen der Bundesanstalt für Gewässerkunde und blickt auf eine 50-jährige Entwicklung zurück. Belastbare Messdaten, *State-of-the-art*-Modellierungstechniken sowie sorgfältig dokumentierte Untersuchungen und ein mit dem Fachdienst FLYS leicht realisierter Zugang zu Modelldaten und Auswertemethoden bilden die Grundlage für die Abflussmodellierung. Auf diesem Gebiet hat sich die BfG national und international zu einem gefragten Partner entwickelt. Das Jubiläum gibt Anlass, Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der großräumigen hydraulischen Abflussmodellierung der Bundeswasserstraßen in einem Kolloquium zu beleuchten.

Nach einem Überblick der wichtigsten Stationen der Entwicklung des Aufgabengebiets in der BfG seit 1968 werden der heute erreichte Stand der ein- und zweidimensionalen Modellierung sowie Beispiele ihrer vielfältigen Anwendungen präsentiert. Neben dem Einsatz für die Beratung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung verdeutlichen zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in Zusammenarbeit mit Partnern aus Bund und Ländern den breiten Anwendungsbereich.

Hydraulische Modelle sind eine wichtige Grundlage der interdisziplinären Zusammenarbeit in der Gewässerkunde. Neben der Beantwortung von Fragen zur Schiffbarkeit und des Hochwasserschutzes tragen sie auch zum Ziel der nachhaltigen ökologischen Verbesserungen der Lebensräume in und an den Gewässern bei. Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten, Überflutungsdauern und andere Größen sind als wesentliche lebensraumbestimmende abiotische Faktoren erkannt. Dabei stellt die Ökologie neue Anforderungen an den Detaillierungsgrad hydraulischer Modelle, denen insbesondere mit mehrdimensionalen Modellen begegnet werden kann.

Das Kolloquium richtet sich an das interessierte Fachpublikum aus Bundes- und Landesbehörden, Beratungsbüros und Verbänden sowie aus Forschung und Lehre.

Abflussmodellierungen in der BfG von 1968 bis 2006

Heinz Engel

1 Einleitung

Länder und Kontinente werden durch Verkehrswege erschlossen, von denen die Wasserwege naturgegeben sind. Sie ermöglichen Kommunikation und Handelsbeziehungen und waren damit den Menschen seit jeher wichtige Lebensgrundlage. – Je moderater die Gewässer sich verhalten, umso einfacher und nachhaltiger sind die unterschiedlichen Nutzungen zu realisieren.

Der Rhein mit einem sehr ausgeglichenen Regime (NQ/HQ 1:10 bis 1:18) und nur wenigen Störungen in der Durchgängigkeit (kaum Katarakte oder unkalkulierbare Strömungsverhältnisse) ist einer der weltweit besten natürlichen Fernwasserwege und bot günstige Voraussetzungen zur Anlage von Siedlungen und für landwirtschaftliche Nutzung.

2 Anthropogene Einflüsse auf den Oberrhein

Trotz seiner von Natur aus günstigen Voraussetzungen war auch der Rhein schon früh Ziel anthropogener Eingriffe. Diese hatten am Oberrhein in den letzten rund 200 Jahren zum Ziel,

- > die mit dem Stromstrich definierte Staatsgrenze auf Dauer festzulegen,
- > genutzte oder zur Nutzung vorgesehene Flächen gegen Überflutungen zu schützen,
- > Schifffahrt durchzuführen, aufrechtzuerhalten und langfristig zu sichern sowie
- > Energie zu gewinnen.

Dabei waren die bedeutendsten Maßnahmen

- > die Rheinkorrektur nach Tulla in den Jahren 1840 bis 1884,
- > der Ausbau mit Staustufen gemäß dem Versailler Vertrag von 1919 sowie
- > der Bau und die Verlegung von Hochwasserdeichen.

Tulla hat durch Ausnutzung der natürlichen Tiefenerosion für den Rhein ein Hauptgerinne (und damit die Grenze zu Frankreich) festgelegt. Als Nebeneffekt wurden die gewässernahen Grundwasserstände abgesenkt. Das ermöglichte die landwirtschaftliche Nutzung vormals versumpfter Flächen sowie die Verdrängung der die Volksgesundheit bedrohenden Malaria.

Der Versailler Vertrag räumte Frankreich am Rhein „zwischen den äußeren Punkten der französischen Grenzen“ das Recht ein, zur Speisung von Schifffahrts- und Bewässerungskanälen „oder für jeden anderen Zweck Wasser aus dem Rhein zu entnehmen“. – Auf dieser

Rechtsgrundlage entstand zwischen 1928 und 1959 der Grand Canal d'Alsace, ein voll abgedichtetes Gerinne für den Schiffsverkehr und zur Energiegewinnung. Zur möglichst weitgehenden Nutzung des Energiepotenzials wurde zunächst der gesamte am Beginn des Kanals in Kembs verfügbare Rheinabfluss abgezweigt, soweit dieser $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht überstieg. Dies führte im Flussbett neben dem Kanal an den meisten Tagen im Jahr zu einem nahezu trockenen Gerinne. Die Folge waren dramatisch sinkende Grundwasserstände in der flussnahen Rheinebene mit entsprechenden Schäden in der Land- und Forstwirtschaft. – Deutsch-französische Gespräche führten zu einer Modifizierung des Rheinausbaus. Zwischen 1957 und 1970 wurden vier weitere Staustufen errichtet, bei denen jeweils Schleuse und Kraftwerk in kurzen Kanälen auf französischem Staatsgebiet gebaut, der Abfluss aber auf Zwischenstrecken zum Rhein zurückgeführt wurde (Schlingenlösung). Zur Stützung des Grundwassers verpflichtete sich Frankreich, einen Abfluss von $40 \text{ m}^3/\text{s}$ grundsätzlich im Rhein neben dem Seitenkanal zu belassen. Ergänzend wurden feste Wehre im „Rest-Rhein“ bzw. die steuerbaren Kulturwehre Breisach und Kehl/Straßburg im Bereich der Schlingen errichtet.

Eine weitere Folge des Staustufenbaus war die Anlage von Deichen unmittelbar an den Flussufern, wodurch die Überflutungsflächen des Stroms drastisch reduziert wurden. Unter Einbeziehung der nach 1970 noch gebauten zwei Staustufen im Rhein hat sich das Überflutungsgebiet zwischen Kembs und Iffezheim (auf 110 km Länge) von ehemals 220 km^2 um 60 % auf 90 km^2 verringert. Dies und die permanenten Staue hinter den Wehren bedeuten beim Durchlauf von Hochwasserwellen den Verlust von Zwischenspeicherung entlang des Flusses mit der Folge einer Aufsteilung des Wellenanlaufs, die die Anlieger unterhalb der Staustufen (am frei fließenden Rhein) als früheres Eintreffen der Scheitel registrierten. Sie hatten auch den Eindruck, dass Hochwassererhöhungen eingetreten waren, und so forderte man Untersuchungen der vermuteten Kausalitäten sowie die Rücknahme schädlicher Wirkungen.

3 Untersuchungen zu Änderungen des Hochwasserablaufs im Rhein

Als Reaktion darauf haben die Regierungen der Länder Deutschland, Frankreich, Schweiz und Österreich im **Juni 1968** die „**Hochwasser-Studienkommission für den Rhein**“ (HSK) gegründet und erteilten ihr den Auftrag, für den Strom bis Worms „folgende Themen zu bearbeiten:

1. Die Hochwässer und ihre Entwicklung vom Beginn der Aufzeichnungen an
2. Einflüsse des Ausbaus des Rheins, seiner Nebenflüsse und der Seen auf das Hochwasser
3. Derzeitiger Stand des Hochwasserschutzes
4. Empfehlungen für „Maßnahmen gegen die durch die Ausbaumaßnahmen nach Ziffer 2 vergrößerte Hochwassergefahr“

Nach ersten Untersuchungen ausschließlich mit statistischen Methoden setzte sich die Erkenntnis durch, dass der zusätzliche Einsatz mathematischer Abflussmodelle erforderlich sein würde. Mit ihrer Hilfe sollten Umrechnungen „*maßgebender Hochwasserereignisse der letzten rund 100 Jahre* (27 Hochwasser aus dem Zeitraum 1876 bis 1972) *auf verschiedene Ausbaustände des Rheins*“ (ohne/mit Staustufen) erfolgen, um ausreichend belastbare Daten für die statistischen Untersuchungen zu gewinnen.

Es wurden zwei „Mathematische Modelle“ erprobt:

1. Ein hydraulisches Modell, beruhend auf der Lösung der kompletten Differentialgleichungen für instationäre Strömung. Es war entwickelt worden beim Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) in Chatou für die Rheinstrecke Basel – Maxau.
2. Ein hydrologisches Modell, das nur die Kontinuitätsbedingung sowie als Ersatz für die Energiebilanz die Beziehung der Volumina der Gerinneabschnitte in Abhängigkeit vom Durchfluss verwendet. Es wurde entwickelt in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz für die Rheinstrecke Basel - Worms.

Nach intensiver Verifizierung der Modellergebnisse an den gemessenen Wellenabläufen sowie umfangreichen Vergleichen der Ergebnisse der beiden Modelle untereinander „beschloß die HSK im Juni 1973 bei den weiteren Rechnungen das für die gesamte Strecke ausgelegte Modell der BfG zu verwenden“.

Das BfG-Modell war einfach in der Handhabung, es verwendete gemessene Flussprofile von Deich zu Deich bzw. zwischen den Hochwassergrenzen und berücksichtigte die Einleitung des großen Nebenflusses Neckar mit seiner im Mündungsbereich gegebenen Retentionswirkung in nach damaliger Auffassung hinreichender Weise. Das Modell des LNH war kompliziert in der Anwendung, rechenintensiv (großer Zeitaufwand) und verwendete idealisierte Flussprofile. Zudem war im Juni 1973 noch keine Lösung zur rechnerischen Berücksichtigung des Neckars verfügbar.

Da gemessene Flussprofile⁽¹⁾ für den Rhein nur für die Zustände vor und nach Ausbau mit Staustufen vorlagen bzw. erhoben werden konnten, beschränkten sich die Modelluntersuchungen zwangsläufig auf diese Gegebenheiten, wobei hierdurch ausschließlich die Wirkungen des Wegfalls der o. g. 130 km² Retentionsgebiet dokumentiert werden. Das Ausmaß der baulichen Eingriffe, verbunden mit dem „Staustufenbau“ wird konkret durch den beispielhaft für eine Staustufe dargestellten Vergleich der Volumendynamik (vor/nach Ausbau) (s. Abb. 1). Man erkennt, der bei Hochwasserdurchlauf nutzbare Retentionsraum ist nach Ausbau praktisch auf Null geschrumpft (BELZ et al. 1999).

Die Modellrechnungen lieferten neben den Wellenverläufen für die unterschiedlichen Ausbauzustände die Hochwasserscheitel für insgesamt 27 Ereignisse aus 83 Jahren (1891-1973). Um die Kollektive der Scheitelabflüsse auf 166 Werte (jeweils 1 Ereignis pro Winter und Sommer jedes Jahres) zu vergrößern, kamen graphische Verfahren zum Einsatz. Bei den Winterkollektiven wurde zusätzlich das sehr extreme Ereignis 1882/83 berücksichtigt. Die Modellrechnungen zeigten sehr deutlich, dass sich die Wirkung des Staustufenbaus primär in einer Wellenbeschleunigung ausdrückt. Sie beträgt im statistischen Mittel für die Stromstrecke Basel-Maxau ca. 30 h. Dies wiederum führt zu einer anderen Überlagerung der Rheinwelle mit den Wellen der Nebenflüsse und zwar so, dass die vor dem Ausbau zumeist schon abgelaufenen Ereignisse der Nebenflüsse vom Rhein als Folge des Ausbaus eingeholt werden und damit ihre Scheitel oft nahezu aufeinander fallen (ENGEL 1997). Abbildung 2 zeigt den geschilderten Effekt beispielhaft am Hochwasser April 1983.

¹ Stromprofile, aufgenommen durch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung; Vorländer und Überflutungsbereiche, aufgenommen durch die Verwaltungen der deutschen Länder Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen sowie der Republik Frankreich

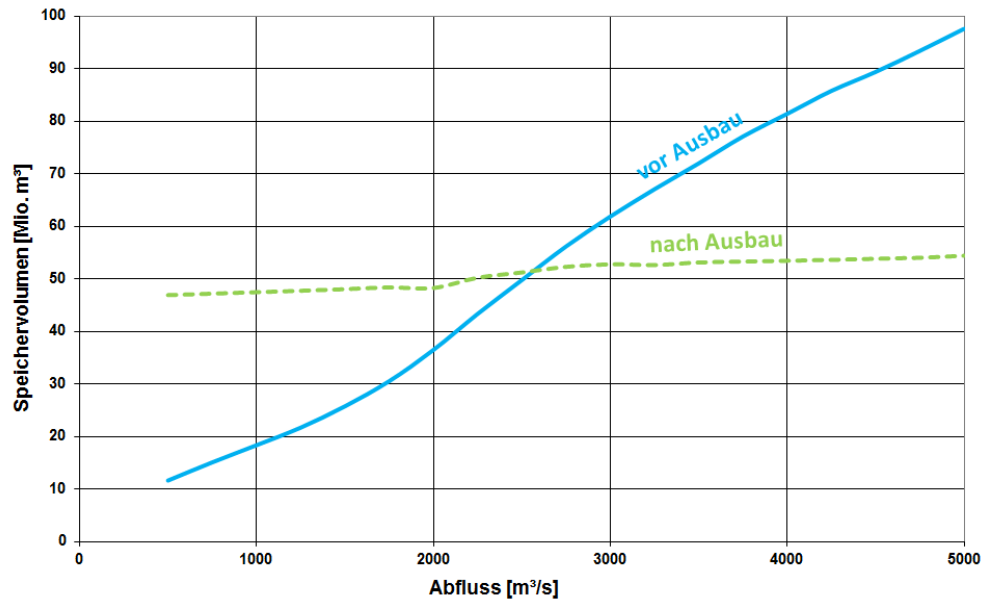


Abb. 1: Bei Wellenablauf in der Stauhaltung Iffezheim verfügbares Rückhaltevolumen (Volumendynamik)

Ziel der HSK-Untersuchungen war es zunächst, zwei Fragen zu beantworten:

1. Wie hat sich die 1955 (vor Staustufenbau) gegebene Hochwassersicherheit durch die Baumaßnahmen verändert?
2. Um welches Maß wurden dabei die Scheitelwerte der vor Ausbau sicher abführbaren Hochwasserwellen (Jährlichkeiten) vergrößert?

Die Antworten für die Pegel Maxau und Worms (oberhalb bzw. unterhalb der Neckarmündung gelegen) lauten:

- > Am Pegel Maxau bestand 1955 ein Abflussvermögen von 5.000 m³/s, was einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren entsprach (ermittelt für Winterhalbjahre). Am Pegel Worms bestand 1955 ein Abflussvermögen von 6.000 m³/s, entsprechend einem Wiederkehrintervall von 220 Jahren (ermittelt für Winterhalbjahre). Nach Ausbau bis Iffezheim verringerten sich die Jährlichkeiten für das jeweilige Abflussvermögen an beiden Pegeln auf nur noch 60 Jahre.
- > Die ausbaubedingten Scheitelabfluss-Zunahmen für die genannten Jährlichkeiten betrugen 700 m³/s am Pegel Maxau und 800 m³/s am Pegel Worms.

Die vorgenannten Erkenntnisse stellten die HSK vor die Aufgabe, Lösungen für die Reduktion der nachgewiesenen Zunahme der Hochwassergefahr zu finden. Da eine Wiederherstellung der ursprünglichen Verhältnisse nicht möglich ist, sollte zumindest die Vergrößerung der Hochwasserscheitel zurückgenommen werden. Dabei wurde der Untersuchungsraum beibehalten. Das heißt, etwaige Veränderungen der Hochwassersituation unterhalb des Pegels Worms waren nicht Gegenstand der HSK-Untersuchungen.

Die Reduktionsmaßnahmen sollten so bemessen werden, „daß ein Schutz gegen das HW 1882/83 und gegen ein 200jährliches HW in Maxau bzw. ein 220jährliches HW in Worms gewährleistet (sein würde)“. Der Umfang der erforderlichen Maßnahmen war anhand einer

vorläufigen Steuerung für eine Gruppe von HW unterschiedlicher Ganglinienformen mit 200-jährlichen bzw. 220-jährlichen Scheitelabflüssen an den Pegeln Maxau bzw. Worms zu ermitteln. Darüber hinaus war nachzuweisen, dass mit den gleichen Maßnahmen auch das Einzelereignis 1882/83 nach Ausbau auf die Sollwerte hätte abgemindert werden können.

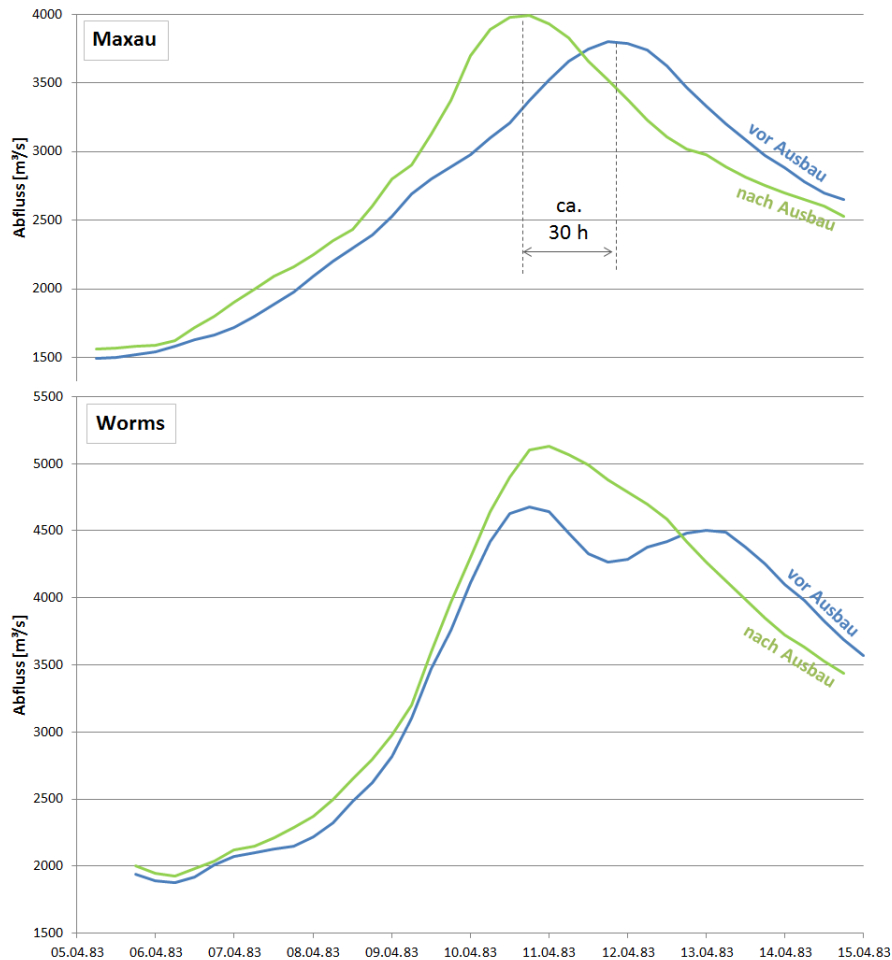


Abb. 2: Änderung des Wellenablaufs (vor/nach Ausbau) am Beispiel des Hochwassers April 1983 an den Pegeln Maxau und Worms

Auf Grundlage der Ergebnisse umfangreicher Berechnungen mit dem mathematischen Wellenablaufmodell der BfG empfahl die HSK folgende Rückhaltemaßnahmen:

- > *Sonderbetrieb der Rheinkraftwerke* (Abflussverzögerung durch Umleitung des Kanalabflusses in das Rheinbett)
- > *Einsatz der Kulturwehre Breisach und Kehl/Straßburg* (Abflussrückhaltung durch zusätzlichen Aufstau hinter den Wehren)
- > *Einsatz von Poldern* (bedarfsgesteuerte Füllung ausgedeichter ehemaliger Retentionsräume des Rheins)

Die Maßnahmen entsprachen einem Retentionsvolumen von 260 Mio m³, mit dessen Einsatz gemäß dem vorläufigen Steuerungskonzept der grundsätzliche Nachweis ihrer Wirksamkeit für die Stromstrecke bis Worms erbracht war.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Wirkung der Retentionsmaßnahmen auf 200-jährliche Hochwasserwellen am Pegel Maxau:

- > Der Scheitelabfluss ist forderungsgemäß verringert.
- > Der schnellere Wellenanstieg (die Wellenbeschleunigung) bleibt im Wesentlichen bestehen.
- > Der Scheitelabfluss ist ggf. mit längerer Dauer verbunden als vor dem Ausbau (ENGEL 1998).

Die Fakten 2 und 3 haben bei Überlagerung der Rheinwelle mit flussab folgenden Nebenflusswellen Auswirkungen, die sowohl negativ als auch positiv ausfallen können. Dieses Erkenntnis führte nach Abschluss der Arbeiten der HSK (1978) zur Gründung einer Hochwasserstudiengruppe (HSG) für die Rheinstrecke Worms/Kaub (1978-1982) und danach zur HSG Kaub/Rolandswerth (1983-1991). Die AG-Mitglieder aus den Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen sowie der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest (WSD SW) und der BfG führten die Untersuchungen der HSK mit deren Werkzeugen weiter. Auch hier bildeten Wellenablaufberechnungen mit dem auf die Strecke Worms-Rolandswerth erweiterten BfG-Modell eine wichtige Untersuchungsgrundlage.

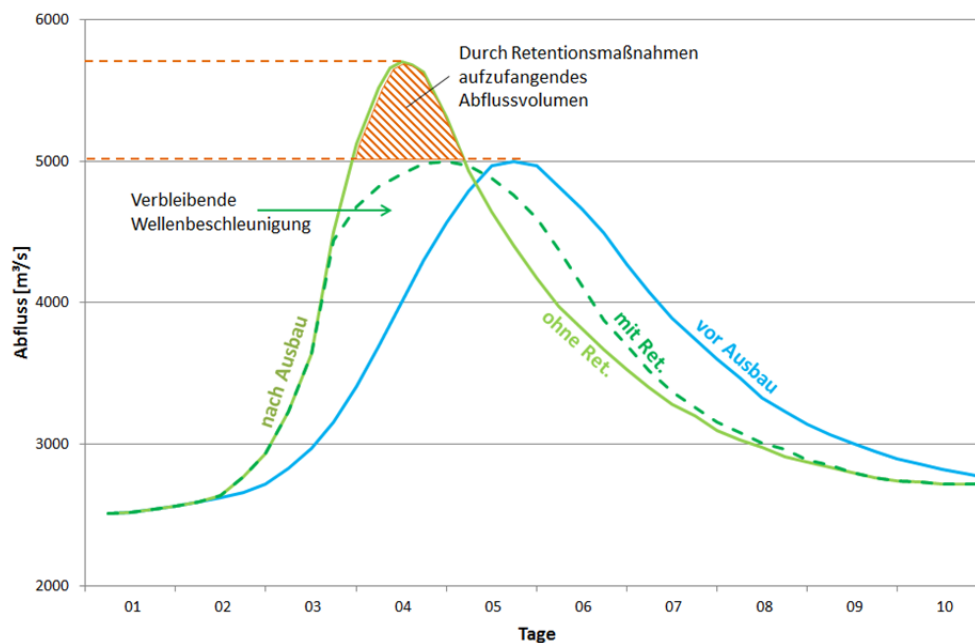


Abb. 3: Prinzipielle Wirkungsweise der Retentionsmaßnahmen auf Rheinwellen mit 200-jährlichen Abflussscheiteln

Die Basis des BfG-Modells bildeten umfangreiche Volumenermittlungen im Flussschlauch und über den Überschwemmungsgebieten unter ausgewählten stationären Wasserspiegeln von NW bis HHW. Das hierzu entwickelte elektronische Rechenverfahren wurde auch genutzt, schiffahrtsrelevante (GLW, HSW) wie wasserwirtschaftlich bedeutsame (NW, MW, BHW) Wasserspiegel für jeden beliebigen Fließgewässerpunkt zu ermitteln. Es wurde weiterhin angewendet zur Verifizierung historischer Wasserspiegelfixierungen wie der Berechnung von Auswirkungen von Sohlveränderungen und Einbauten in das Gewässer auf stationäre Wasserstände.

In Rolandswerth erreicht der Rhein das Land Nordrhein-Westfalen (NRW) und im Weiteren die Norddeutsche Tiefebene. Hier, im untersten deutschen Rheinabschnitt und im anschließenden Delta des Stroms, liegen zum Teil Jahrhunderte alte Polder, die ineinander verzahnt und teilweise grenzübergreifend angelegt sind. Ihre Dammsysteme und ihr möglicher Einsatz als Rückhaltebecken dienen dem Schutz der Bevölkerung in Deutschland und den Niederlanden. Einsatzregelungen für Rückhaltungen zum Beispiel können damit nur grenzüberschreitend einvernehmlich erarbeitet werden. Es war daher selbstverständlich, bei der Gründung der **HSG für den Rhein in NRW (1990-2000)** unter Führung des Landes NRW Kollegen aus den Niederlanden einzubeziehen. Wegen der komplexen flächenhaften Überflutungen sowie zur Simulation von Einsatzsteuerungen der Polder im Hochwasserfall erwies es sich als sinnvoll, das inzwischen den Anforderungen nicht mehr gerecht werdende hydrologische Wellenablaufmodell der BfG durch eine technisch leistungsfähigere Neuentwicklung zu ersetzen. Im Einvernehmen aller Beteiligten wurde das in den Niederlanden erarbeitete hydraulische Modell SOBEK für den Einsatz am Niederrhein eingerichtet und bei der BfG installiert.

Schon unmittelbar nach Abschluss der Arbeiten der HSK war das BfG-Modell der Rheinstrecke Basel-Worms an die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU BW) übergeben worden zur Verwendung bei den Detailuntersuchungen hinsichtlich unterschiedlicher Maßnahmen und mannigfach modifizierter Steuerungen zu deren Einsatz. Um die steigenden Anforderungen an die Modelltechnik rechentechnisch und vom Zeitaufwand her zu optimieren, wurde im LfU BW das „Synoptische Modell“ Basel-Worms entwickelt, das ab 1986 offizielles Planungs- und Nachweisinstrument für diesen Stromabschnitt und auch in der BfG verfügbar wurde. Sein Einsatz dient seitdem insbesondere den fortlaufenden Entwicklungen der mit jedem neuen Baustein zur Hochwasserbeeinflussung notwendigen Steuerungsvorgaben und den Nachweisen zu deren Wirksamkeit in der internationalen „AG Manöver“ der „Ständigen Kommission zum Ausbau des Oberrheins“.

Mehrere staugeregelte Wasserstraßen sind Nebenflüsse des Rheins. Für sie stellt sich ebenfalls die Frage nach den Wirkungen des Ausbaus auf die Hochwassersituation. Von 1973 bis 1987 erfolgte der Ausbau der Saar zwischen Saarbrücken und der Einmündung des Gewässers in die Mosel. Parallel zu den Bauarbeiten (1978-1980) wurde in der BfG ein Wellenablaufmodell Saar erstellt. Die Ergebnisse der Berechnungen waren:

- > Die Scheitel großer Saar-Hochwasser treffen nach Ausbau im Mittel ca. 7 h früher an der Mündung ein als vor dem Ausbau.
- > Erhöhungen 100-jährlicher Abflüsse (HQ_{100}) sind marginal.

Bemerkenswert ist, dass die Scheitel von Obermosel und Saar historisch häufig aufeinander getroffen sind, die Beschleunigung der Saar durch den Ausbau die Saarwelle jedoch der Moselwelle vorweg laufen lässt, wodurch die Moselscheitel in Trier erniedrigt, also günstig beeinflusst werden.

Zwischen **1985 und 1995** arbeitete die **deutsch-luxemburgische Expertengruppe „Hochwasserhydrologie Mosel/Saar“**. Im Rahmen ihrer Untersuchungen wurde in der BfG zunächst ein synoptisches Wellenablaufmodell für die Mosel von Apach bis Koblenz (242 km Länge) erstellt. Eine weitere Modellstrecke umfasst die französische Mosel von Custines bis Apach (102 km Länge). Diese konnte leider nur für den Zustand nach Ausbau kalibriert werden. Ziel war es auch für diese Modellanwendung, Änderungen des Hochwasserablaufs infolge des Ausbaus mit Staustufen zu ermitteln.

Es ergab sich als Ausbaufolge von Mosel und Saar insgesamt bei großen Hochwassern ein früheres Eintreffen der Scheitel in Koblenz um ca. 1,5 h bei einer Abflusserhöhung um gut 70 m³/s. Diese geringen Beträge sind der Tatsache geschuldet, dass ab 2.200 m³/s in der Mosel unterhalb von Trier Abflussverhältnisse wie vor dem Ausbau eintreten. Allerdings werden Wellenscheitel, die unterhalb Trier 2.200 m³/s nicht erreichen infolge der bis zu diesem Abfluss geltenden Dauerstaue, zwischen Trier und Koblenz um 12 bis 18 Stunden beschleunigt (Deutsch-Luxemburgische Expertengruppe 1995).

4 Nachweise zur Wirksamkeit vorgeschlagener und ausgeführter Schutzmaßnahmen

Alle für die Oberrheinstrecke Basel-Worms vorgeschlagenen HW-Schutzmaßnahmen (einschließlich deren Steuerungen) dienen ausschließlich der Wiederherstellung des vor 1955 bestehenden Schutzes der Anlieger dieses Stromabschnitts. Somit war vor Abschluss der weiteren Untersuchungen bis Emmerich durchaus unklar, inwieweit am Oberrhein eingesetzte Maßnahmen den Unterliegern nutzen oder möglicherweise sogar schaden könnten. Im März 1988 ereignete sich ein Hochwasser, das am Oberrhein Abflussscheitel erreichte, die nach dem seinerzeit gültigen Reglement für den Einsatz der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Rückhaltemaßnahmen, diese erstmals anspringen ließ. Unmittelbar nach Ablauf des HW-Ereignisses konnte mit den vorhandenen Wellenablaufmodellen der mit dem Einsatz von nur 25 Mio. m³ Retentionsvolumen erzielte Effekt quantifiziert werden. Vergleichende Modellrechnungen in der LfU BW für den Flussabschnitt Basel bis Worms und in der BfG für die Strecke ab Worms bis zur deutsch-niederländischen Grenze haben gezeigt, dass die auf den Pegel Maxau ausgerichtete Wirkung auch alle Scheitelwerte stromab günstig beeinflusst hat. Die in Maxau erreichte Scheitelreduktion im Dezimeter-Bereich ermäßigte sich bis Köln allerdings auf 3 bis 5 cm. – Die beeinflusste Welle stieg im Mittelrhein oberhalb der Moselmündung auf die höchsten bis dahin gemessenen Abflüsse und in Köln noch auf eine Größenordnung, die zum erstmaligen Aufbau mobiler Schutzwände führte. Diese wurden durch die Auswirkungen der Maßnahmen am Oberrhein gerade nicht überströmt (KHR 1990).

Zum Jahreswechsel 1993/94 und nur 13 Monate später, im Januar 1995, ereigneten sich im Rheingebiet zwei sehr extreme Hochwasser. Sie gaben den Anstoß zu politischen Willensbekundungen hinsichtlich durchgreifender Aktionen zum Hochwasserschutz und gipfelten in der „Erklärung von Arles“, verabschiedet durch die EU-Umweltminister (in Abstimmung mit der Schweiz) am 4. April 1995. Darin wurde die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) beauftragt, einen Aktionsplan Hochwasser (APH) für den Rhein und sein Einzugsgebiet zu entwickeln. Der APH wurde am 22. Januar 1998 der 12. Rheinministerkonferenz vorgelegt und mit einer Laufzeit bis 2020 beschlossen.

Im März 1999 konnte ein (unter maßgeblicher Beteiligung der BfG arbeitender) Expertenkreis der Projektgruppe APH einen Bericht zur „Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins“ vorlegen (IKSR 1999). Hier wird erstmalig jede denkbare Möglichkeit zum Wasserrückhalt im Rheineinzugsgebiet berücksichtigt, ohne eventuell gegen einzelne Maßnahmen bestehende politische Bedenken als Ausschlusskriterien zu

akzeptieren.⁽²⁾ Die Abschätzungen ergeben größenordnungsmäßig, dass sehr extreme Wasserstände am Oberrhein um 80 cm und zwischen der Mainmündung und Lobith um 100 cm reduziert werden können. Diese Ergebnisse ließen die die HW-Scheitel betreffenden Reduktionsziele des APH

- > um 5 cm bis zum Jahr 2000,
- > um bis zu 30 cm bei Extremhochwasser im frei fließenden Rhein bis 2005 und
- > um bis zu 70 cm bei Extremhochwasser im frei fließenden Rhein bis 2020

realistisch erscheinen.

Seit Mitte der 2000er-Jahre gibt es im Rheingebiet für die Gewässerstrecken der WSV eine lückenlose Folge von Abflussmodellen entweder des synoptischen Typs oder des Typs SOBEK, für Teilstrecken auch beide Modelle (s. Abb. 4). Damit sind Fragestellungen hinsichtlich großräumiger Auswirkungen von Baumaßnahmen in und neben den Flüssen jederzeit beantwortbar. Bei Kopplung mit Niederschlag-Abfluss-Modellen sind inzwischen auch Antworten auf Fragen nach den Auswirkungen theoretischer Niederschlags- oder Bodennutzungsszenarien möglich. – Ein Beispiel dafür bot das Elbe-Hochwasser 2002. Rheinanlieger beschäftigte die Frage, wie gefährlich ein Hochwasser wohl im Rhein sein würde, als Folge einer Wetterlage wie die im Elbegebiet eingetretene. Unterschiedliche Abschätzungen sowie eine in den Niederlanden durchgeführte Modellrechnung unter Berücksichtigung des in das Rheingebiet verschobenen Niederschlagsgebiets „Elbe 2002“ führten übereinstimmend zu der Feststellung, dass dies am Niederrhein allenfalls Abflüsse liefern würde, die denen von 1995 entsprächen.

Was die vom APH versprochenen Reduktionsziele betrifft, so konnte 2006 mit dem bestehenden Instrumentarium nachgewiesen werden,

- > das Ziel (5 cm Reduktion) für das Jahr 2000 wurde im Prinzip erreicht,
- > das Ziel (30 cm Reduktion) für das Jahr 2005 wurde
 - für den Oberrhein erreicht,
 - für die weitere Strecke mit nur ca. 10 cm Reduktion bis Lobith jedoch nicht (IKSR-Expertengruppe HVAL 2006).

5 Anmerkungen zur Zusammenarbeit im Rheingebiet seit 1968

Transparenz der HW-Untersuchungen gegenüber Dritten sowie Aussagen über Wirkungen festgestellter Änderungen des Abflussverhaltens unterhalb der Untersuchungsstrecken war während der Arbeit der HSK (aber durchaus auch noch später) kein Hauptanliegen. Manche Ergebnisse durften nicht öffentlich gemacht, andere Untersuchungen nicht durchgeführt werden. Für einige denkbare Retentionsmaßnahmen bestand Einsatzverbot, ja über sie durfte nicht offiziell nachgedacht werden. Das ließ Delegationen in der HSK gelegentlich damit drohen, bei Nichtbeachtung dieser Festlegungen, die Mitarbeit in der Kommission zu beenden. Zudem wurde immer wieder deutlich, dass Oberlieger vor allem den eigenen Nutzen und weniger die Probleme der Unterlieger im Auge hatten.

² In hydrologischen Winterhalbjahren besteht z. B. (bei Beachtung entsprechender Randbedingungen) die Möglichkeit, den Wasserspiegel des Bodensees durch Drosselung des Seeabflusses um ca. 100 cm anzuheben. Pro 10 cm Seespiegelanstieg ergäbe dies während der Dauer einer im Mittel 10-tägigen Hochwasserperiode in Köln Wasserstandsermäßigungen von rund 4 cm. Bei 40 cm Seespiegelanhebung würden ca. 15 cm geringere Wasserstände erzielt (stromauf bei geringeren Breiten des Rheins, entsprechend mehr).

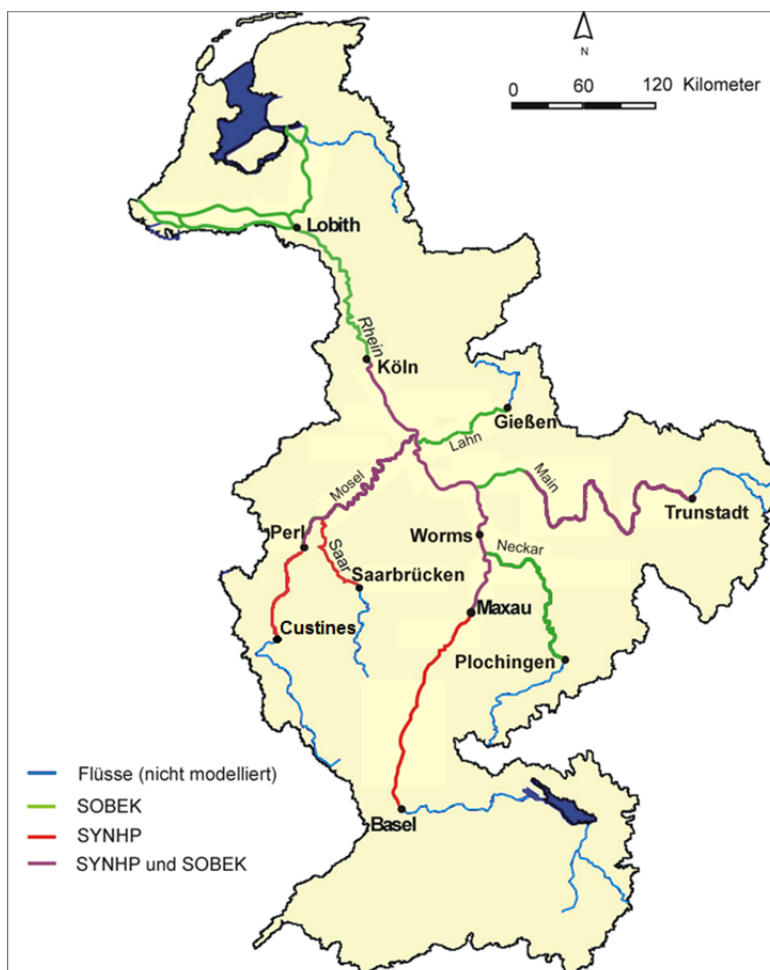


Abb. 4: Für Bundeswasserstraßen im Rheingebiet verfügbare Abflussmodelle (Stand: 2006)

Auch in der WSV waren zuweilen Widerstände zu überwinden. Mit dem Argument „Hochwasserschutz ist Ländersache“ wurde versucht, weiterführende Hochwasseruntersuchungen in der BfG zu unterbinden oder auf wenige Ausnahmen zu begrenzen. So untersagte das zuständige Ministerium zeitweise die nicht beauftragte Ausweitung der HW-Modelle in der BfG. Dabei wurden politische Überlegungen den wissenschaftlich-technischen Interessen sowie dem Streben nach Erkenntnis übergeordnet. Das hinderte allerdings die gleiche Stelle nicht daran, schnellstmöglich Berechnungen zu erwarten mit Instrumenten, die es gar nicht hätte geben dürfen, um finanzielle Forderungen von Anliegern abzuwehren, die mit Folgen des Rheinausbaus begründet wurden.

Die inzwischen praktizierte Länder und Zuständigkeiten übergreifende Zusammenarbeit aller Rheinanlieger in der IKS, insbesondere auch im Rahmen des „Aktionsplans Hochwasser“, ist ein Vorbild in Europa und weltweit. Besonders wichtig ist zudem die vorausschauende Problemerkennung und -bearbeitung, weitgehend ohne Einschränkungen durch politisch gesetzte Tabus.

6 Zusammenfassung

Die vorstehenden Ausführungen geben einen Überblick über Veranlassung und Entwicklung von Hochwasseruntersuchungen im Rheingebiet unter Einsatz mathematischer Abflussmodelle seit 1968 bis in das Jahr 2006. Dabei werden die verwendeten Modelle im Überblick vorgestellt und ihre Ergebnisse beschrieben. Besonders hervorgehoben wird die Länder und Staaten übergreifende Zusammenarbeit, deren Qualität sich über die Jahre vertieft und verbessert hat, so dass heute flussgebietsweite Untersuchungen und Ziele realisiert werden können, im Interesse aller Anlieger, die aktuell und in Zukunft betroffen sind.

Literatur

- BELZ, J.-U., N. BUSCH, H. ENGEL, G. GASBER (1999): Vergleichende Darstellung der Ausbaumaßnahmen an Oberrhein, Mosel und Saar und ihre Auswirkungen auf Hochwasser. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 43. Jahrgang, Heft 6, S.283-291
- HSK - Hochwasser-Studienkommission für den Rhein (1978): Ergebnisse der Untersuchungen über die Hochwasser und ihre Entwicklung von Beginn der Aufzeichnung an, die Einflüsse des Ausbaus des Rheins, seiner Nebenflüsse und der Seen auf das Hochwasser, den derzeitigen Stand des Hochwasserschutzes sowie : Empfehlungen für Maßnahmen gegen die vergrößerte Hochwassergefahr; Schlussbericht
- Deutsch-Luxemburgische Expertengruppe „Hochwasserhydrologie Mosel/Saar“ (1995): Hochwasserhydrologie Mosel und Saar im deutsch-luxemburgischen und deutschen Einzugsgebiet
- ENGEL, H. (1997): Die Ursachen der Hochwasser am Rhein – natürlich oder selbstgemacht? In: Immendorf, R. (1997) (Hrsg.): Hochwasser. Natur im Überfluss? 1. Auflage. Heidelberg: C.F. Müller Verlag
- ENGEL, H. (1998): Die Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein Steuerstrategien zu ihrem Einsatz. Wasserwirtschaft, 88. Jahrgang, Heft 5
- IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (1999): Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins, IKS
- IKSR-Expertengruppe HVAL (2006): Abschlussbericht: Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen des Aktionsplans Hochwasser bis 2005
- KHR - Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets (1990): Das Hochwasser 1988 im Rheingebiet. Bericht Nr. I-9 der KHR, 1990, CHR/KHR
ISBN 90-7098-011-8
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2002): Projectie van de Elbe-zomerneerslag op de Rijn en Maas



Kontakt:

Dipl.-Ing. Heinz Engel

Im Schild 18

56323 Waldesch

Tel.: 02628/ 3972

E-Mail: engel.waldesch@gmx.de

Jahrgang 1941

1961 – 1967

Studium des Bauingenieurwesens an der
TH Karlsruhe

1967 – 1968

Neue Heimat, Wohnungsbaugesellschaft

1968 – 1971

F. H. Kocks KG Ingenieure Koblenz

1971 – 2006

Bundesanstalt für Gewässerkunde, zuletzt als Leiter
des Referats M1 „Wassermengen, Wasserstände,
Abflussmodelle“

Abflussmodellierung in der BfG heute

Thomas Maurer

1 Einleitung

Kernaufgabe der Bundesoberbehörde Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ist die Beratung der in der Linie für die Daseinsvorsorge und damit das Funktionieren der Zivilgesellschaft zuständigen Institutionen unseres Staates. Die BfG liefert den Entscheidungsträgern fachliche Analysen zum Ist-Zustand der Bundeswasserstraßen (BWaStr) und zu deren möglicher zukünftigen Entwicklung und macht wissenschaftlich-technisch fundierte Vorschläge für Maßnahmen, die vor dem Hintergrund der Nutzungs- und Entwicklungsziele in den gesellschaftspolitischen Entscheidungsprozess einfließen. Hierzu benötigt die BfG Werkzeuge bzw. Instrumentarien, die sie erwirbt oder – soweit am Markt nicht verfügbar – im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten selbst entwickelt bzw. entwickeln lässt.

Im Kontext dieses Kolloquiums handelt es sich bei den Werkzeugen bzw. Instrumentarien um numerische Simulationsmodelle für den Abfluss und die Wasserstände in den Bundeswasserstraßen. Zu unterscheiden sind dabei einerseits die zugrundeliegenden Modellsoftwaresysteme sowie die mit deren Hilfe andererseits aufgebauten Modelle für konkrete Abschnitte der BWaStr (und ggf. unterschiedliche Aufgaben und damit Modellausprägungen).

Modellierung ist also kein Selbstzweck, sondern kann als möglichst „schlaue“ Methode zur Inter- und Extrapolation von Messdaten aufgefasst werden, um gegenwärtige und mögliche zukünftige Zustände flächendeckend zu beschreiben und im Rahmen der Beratung vergleichen zu können (MAURER 2017). Messdaten (vornehmlich der Linienbehörden) und Modelle (der Oberbehörden) ergänzen sich synergetisch, d. h. das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Denn einerseits kann es keine belastbaren Modelle ohne ausreichende Messdaten geben. Umgekehrt liefert die prozessorientierte Modellierung hinsichtlich der Datengüte, des Wissensstands und der Zusammenarbeit vielfältigen Mehrwert:

- > **Qualitätssicherung:** Widersprüche und Fehler in Messdaten und Prozessparametrisierungen werden in der Zusammenschau mit der Prozessabbildung aufgedeckt.
- > **Interpolation und Extrapolation:** Mithilfe der Modelle können interessierende Zustandsvariablen an Stellen in Raum und Zeit ermittelt werden, an denen keine Messdaten vorliegen. Damit kann auch die Dynamik besser verfolgt werden.
- > **Szenariofähigkeit:** Simulation noch nicht existierender und daher messtechnisch nicht erfassbarer Planzustände wird ermöglicht.
- > **Strukturierung des Denkens** und der Kommunikation über eine Problemstellung bei allen Beteiligten (sowie über die erforderlichen Arbeitsschritte) wird erleichtert.

- > **Verbessertes Systemverständnis** entsteht bei allen Beteiligten.
- > **Wissenstransfer** von der Praxis (der Linienbehörden) zur Theorie (der Oberbehörde) und umgekehrt wird unterstützt.

2 Einsatzzwecke der Modelle

Die BfG erstellt und verwendet hydraulische Modelle für die **Beratung** unterschiedlicher **Auftraggeber** (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bundesländer, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), BfG-interne Beratung, etc.) hinsichtlich unterschiedlicher **Aufgabengebiete** und Problemkreise. Obwohl die BfG im Geschäftsbereich des Bundesverkehrsministeriums angesiedelt ist, dienen die Modelle nicht einzig dem Zweck, Grundlagen für die reine verkehrliche Nutzung der BWaStr zu schaffen (v. a. verkehrlicher Ausbau, verkehrliche Unterhaltung, Wasserstandsvorhersage). Weitergehende Fragestellungen ergeben sich z. B. aus der Notwendigkeit, in Planfeststellungsverfahren gestiegenen gesellschaftlichen Anforderungen an die Abwägung und Kompromissfindung teilweise widerstreitender Nutzungs- und Schutzinteressen gerecht zu werden (z. B. Gütefragen und ökologische Fragen, vgl. HORCHLER & ANLAUF 2018) sowie – in logischer Folge – auch aus einem in den letzten Jahren erweiterten Aufgabenspektrum der WSV, die mittlerweile auch für die wasserwirtschaftliche Unterhaltung und die ökologische Durchgängigkeit der BWaStr zuständig ist. Dieser Wandel drückt sich z. B. im „Bundesprogramm Blaues Band Deutschland“ oder im Prozess des Gesamtkonzepts Elbe aus.

Aus den Aufgaben des Bundes und der Länder ergeben und ergeben sich darüber hinaus Kooperationsmöglichkeiten zum gegenseitigen Nutzen (z. B. HATZ 2018), insbesondere in den Bereichen Hochwasserschutz und Wasserstandsvorhersage.

Hinsichtlich von **Wirkungsnachweisen geplanter Hochwasserschutzmaßnahmen** konnte die BfG anknüpfend an die von ENGEL (2018) aufgezeigte diesbezügliche Entwicklung der Modelllandschaft von 1968 bis 2006 ihre Modelle seither weiterentwickeln und nach den Nachweisen für den Aktionsplan Hochwasser (APH) der IKSR zum Zeitpunkt 2005 (IKSR 2006, 2007) auch für Nachweise des 2010 erreichten Zustands einsetzen (IKSR 2012a, 2012b).

In jüngerer Zeit wurde infolge der Hochwasser vom Mai/Juni 2013 von Bund und Ländern das Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) beschlossen. Es sieht in den kommenden 20 Jahren Investitionen von mehr als 5 Mrd. Euro vor, von denen der Bund in den ersten 10 Jahren 1,2 Mrd. Euro zur Förderung von Maßnahmen mit überregionaler Wirkung übernehmen wird. In Zuge dessen wurde der Aufbau, die Entwicklung und Pflege sowie der Betrieb eines in der BfG angesiedelten Bund-Länder-Beratungs- und Modellierungsdienstes beschlossen, der auch die Etablierung und Umsetzung eines Koordinationsmechanismus bzw. einer Bündelfunktion des Bundes zur fachlich-wissenschaftlichen Begleitung der Fortschreibung des NHWSP und der Priorisierung von Maßnahmen in enger Abstimmung mit dem BMU (Zielvorgaben) und den Ländern/Flussgebietsgemeinschaften (organisatorische und fachliche Rahmenbedingungen) vorsieht. Als Pilot dazu baut die BfG seit Herbst 2015 im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes in enger Kooperation mit der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) die Version 1.0 eines Bund-Länder-

Nachweisinstrumentes auf, bestehend aus gekoppelten Modellen des Bundes und der Länder im Rhein-, Elbe- und Donaeinzugsgebiet. Wirkungsnachweise aus diesem Projekt werden 2019 vorliegen (weitere Details s. MATHAN 2018, SCHUH & SCHMID 2018).

Wie von MEIBNER & RADEMACHER (2018) vertieft dargestellt, wurden seit den 1980er-Jahren in der BfG zunächst modelltechnisch unabhängig von der Fragestellung der Wirkungsnachweise **Wasserstands- und Abflussvorhersagemodelle und -systeme** entwickelt, deren Fokus auf Rechengeschwindigkeit und hoher absoluter Genauigkeit sowohl des Wasserstandes als auch dessen zeitlichen Eintreffens an den Vorhersagepegeln liegt, und die damit andere Anforderungen als die bisher genannten Anwendungen stellen. Zunächst wurden Mehrkanal-Filter-Modelle eingesetzt, bevor in den 1990er-Jahren in Eigenentwicklung ein hydrodynamisches Modellsystem nach dem Charakteristiken-Verfahren aufgebaut wurde (WAVOS-1D). Auch auf dem Gebiet der Vorhersage hat sich vielfach eine fruchtbare Zusammenarbeit zwischen dem an den BWaStr für die Niedrig- und Mittelwasserstandsvorhersage zuständigen Bund und den für die Hochwasservorhersage zuständigen Ländern entwickelt.

Die hydraulischen Modelle der BWaStr sind darüber hinaus auch Grundlage für großräumige **Feststofftransportmodelle** der BfG. In Verbindung mit Schwebstoff- und Geschiebetransportmessungen liefern sie die Basis für die Beratung der für die Gewässerunterhaltung zuständigen WSV zu Fragen der Gewässerbettentwicklung, des Sedimenthaushalts und des Sedimentmanagements (Baggerungen) sowie zu morphologisch-ökologischen Wirkungszusammenhängen.

3 Modelltechnik und Modellbestand

In Konsequenz der im vorherigen Kapitel illustrierten unterschiedlichen Auftraggeber und Aufgabenstellungen entstehen die hydraulischen Modelle der BfG aus unterschiedlichen Anlässen und mit unterschiedlicher Finanzierung. Insgesamt ergibt sich damit hinsichtlich des Modellbestandes die synergetische Situation, dass bei neuen Projekten oft auf Vorarbeiten im Zusammenhang mit einer anderen früheren Aufgabenstellung zurückgegriffen werden kann.

Aufgrund der Tatsache, dass hydrodynamische Modellsysteme in zunehmend professioneller Qualität am Markt erhältlich sind, wurde darüber hinaus bereits 2006 die strategische Entscheidung gefällt, im Referat „Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen“ die Weiterentwicklung des BfG-eigenen hydraulischen Rechenkerns WAVOS-1D einzustellen und statt dessen alle neuen hydraulischen 1D-Modelle auf Basis eines etablierten kommerziellen Modellsystems aufzubauen. Im Sinne der politisch gewollten Entwicklung von einer ihre Aufgaben selbst durchführenden hin zu einer die Aufgabenerfüllung gewährleistenden Verwaltung erleichtert dies auch den Aufbau hydraulischer Modelle auf dem Weg der Vergabe an einschlägige Dienstleister.

Die Wahl fiel wegen seiner Vielseitigkeit (u. a. instationäre Gerinnehydraulik, Gewässergüte, Sedimenttransport und Morphologie) sowie aufgrund von Synergieeffekten in der Zusammenarbeit mit den niederländischen Kollegen im Rheingebiet auf das Modellsystem SOBEK von DELTARES. Diese Software ist durch ihren weltweiten Einsatz für ingenieurpraktische sowie wissenschaftliche Fragestellungen fachlich anerkannt und für ein breites Aufgabenspektrum umfassend validiert (vgl. Abb. 1).

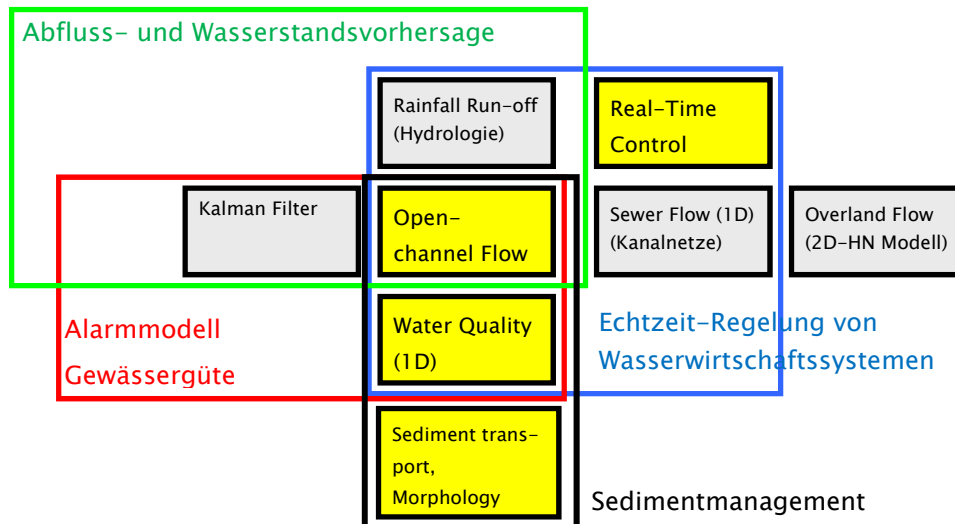


Abb. 1: Übersicht der SOBEK-Module und Möglichkeiten ihrer Verknüpfung in wasserwirtschaftlichen Anwendungen (gelb = aktuell in der BfG genutzte Module).
Quelle: DELTARES, modifiziert

Seit 2013 wurde darüber hinaus begonnen, in Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern der Länder großräumige 2D-Modelle für einige BWaStr aufzubauen. Gegenwärtig wird an der Weser auch für eine originäre Aufgabenstellung der WSV ein 2D-Modell per Vergabe erstellt (weitere Einzelheiten s. PROMNY et al. 2018, YÖRÜK 2018 und BUSCH 2018a). Dabei wurde aus gleichen Gründen wie bei der Entscheidung für SOBEK auf das Modellsystem DELFT3D von DELTARES zurückgegriffen, zumal DELTARES an der Integration der verschiedenen Module seiner Modellwelt arbeitet, die u. a. mittelfristig eine gemischte 1D-2D-3D-Modellierung ermöglichen wird.

Aufgrund der geschilderten Umstände und Entscheidungen gelingt es, gemessen am für den Aufgabenbereich zur Verfügung stehenden Personalstamm, auf einen vergleichsweise großen Modellbestand für mittlerweile praktisch alle BWaStr zurückgreifen zu können (s. Tabelle 1 und Abb. 1 in BUSCH 2018a).

Einmal aufgestellte Modelle haben jedoch keineswegs für die Ewigkeit Bestand, sondern veralten mehr oder weniger schnell. Tabelle 1 verdeutlicht, dass zwischen Fertigstellung eines Modells und dessen Datenstand (insbesondere Geometrie und berücksichtigte Bauwerke) ohne weiteres fünf bis zehn Jahre liegen. Darüber hinaus erfordern neue Ereignisse, Fragestellungen oder neu geplante Maßnahmen, dass Modelle fortgeschrieben werden. Hinzu kommen schließlich rein durch die (immer schnellere) technische Weiterentwicklung von z. B. Betriebssystemen, Modellsystemversionen, Datenschnittstellen bedingte Anforderungen, Modelle zu aktualisieren. Abbildung 2 illustriert den Kreislauf der Modellaktualisierung.

Spätestens bei jeder Einführung neuer Abflusskurven muss(t)en die hydraulischen Modelle der BfG idealerweise nachgeführt werden, da veränderte Abflusskurven Ausdruck erheblich veränderter Bedingungen sind (insbesondere veränderte geodätische Grundlagen (DGM-W) und Wasserbauwerke). Das Idealziel wäre, jederzeit einsatzbereite aktuelle Modelle aller BWaStr vorzuhalten. In der Realität wird ihr Aufbau oder ihre Aktualisierung häufig erst bei akutem Bedarf projektbezogen in Angriff genommen, mit entsprechenden langen Lauf- und

Wartezeiten, bis alle aufeinander aufbauenden Arbeitsschritte (und Abstimmungen!) einschließlich Vergaben abgeschlossen sind: Messnetzplanung, Datenerhebung, Datenhaltung, DGM-W-Aufbau, Aktualisierung der Software (neue Betriebssysteme, neue Herstellerversionen, neue Modellanforderungen), Modellaufbau für den konkreten Fluss(abschnitt), Modellkalibrierung, Varianteneinbau, Maßnahmenuntersuchungen, Schlussbericht.

Tabelle 1

Bestand hydraulischer Modelle von Bundeswasserstraßen
(vgl. Karte Abb. 1 in BUSCH 2018a, s. S. 30 in diesem Heft)

Abschnitt	von	bis	Länge	Modell- system	Modell- zustand *	Fertigstellung
BWaStr	km	km	km	Software	Jahr	Jahr
1D-Modelle						
Rhein	336,2	866,3	530,1	SOBEK River	2010-2014	2014
Oberrhein	164	336,2	172,2	SOBEK River	2004-2010	2018
Neckar	202,5	0	202,5	SOBEK River	1995	2002
Main	390,9	0,1	390,8	SOBEK River	2005-2012	2014
Mosel	242,2	1,9	240,3	SOBEK River	1998	2011
Saar	93	0	93	SOBEK River	1999-2002	2010
Lahn	-3,2	137,3	140,5	SOBEK-RE	2003-2005	2011
Donau	2587	2201	385,7	SOBEK River	2003-2017	2018
Weser	0	35,97	35,97	SOBEK River	1995	2009
Werra	11,7	89	77,3	SOBEK River	2001	2009
Fulda	-10,9	109,2	120,1	SOBEK River	1998-2007	2009
Elbe	0	598,3	598,3	SOBEK River	2004-2007	2009
Saale	89,2	0	89,2	SOBEK River	1995	2009
Havel	103,9	166,6	62,7	SOBEK River	1995	2009
Oder	542,4	704,1	161,7	SOBEK-RE	2003	2008
Summe 1D	3300					
2D-Modelle						
Weser	0	362,2	362,2	Delft3D-FM	2010-2012	2018
Elbe	388,3	598,3	210	Delft3D-FM	2006-2014	2018
Havel	0,4	166,6	166,2	Delft3D-FM	2004-2015	2018
Summe 2D	738,4					

*) Zeitspannen aufgrund unterschiedlicher Datengrundlagen, z. B. DGM-W und Bauwerksgeometrie

hell kursiv: geplante Fertigstellung

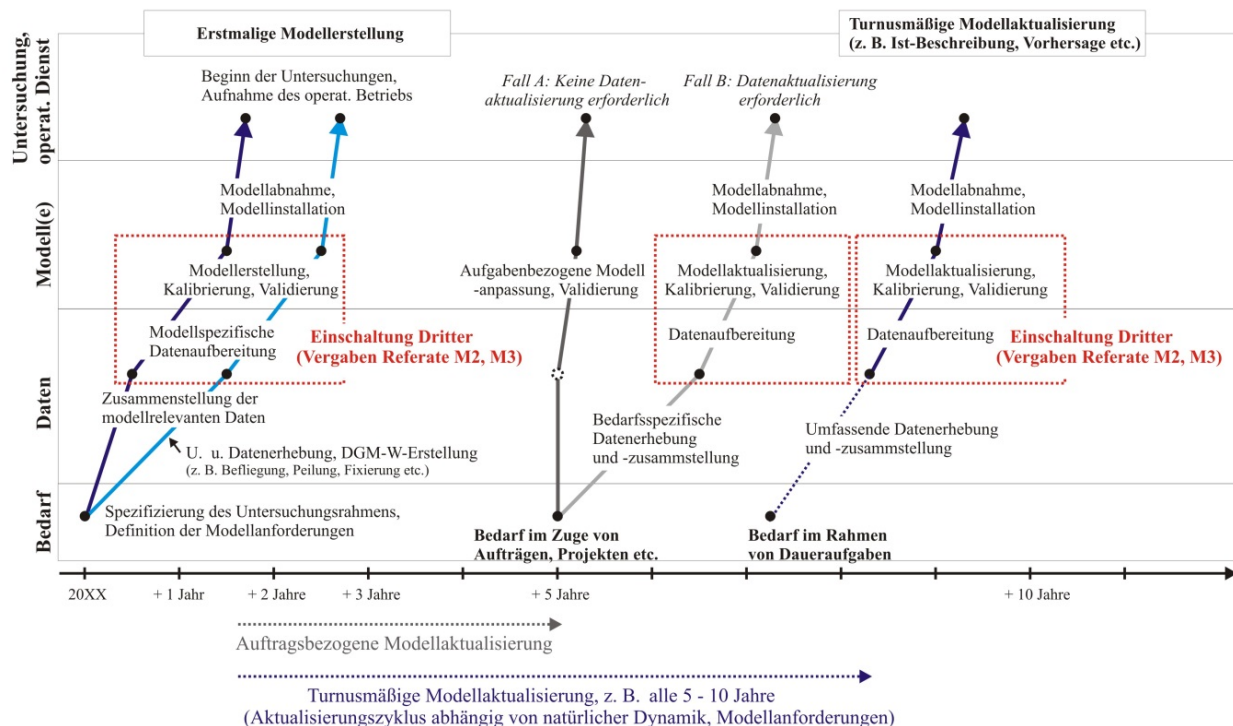


Abb. 2: Aktualisierungszyklen: Nach der Modellaufstellung ist vor der Modellaufstellung.
Quelle: BfG

4 Modellumgebung

Höhere Service-Level in der Auftragsbearbeitung erreicht man, je mehr der grundlegenden Arbeitsschritte der im vorherigen Kapitel genannten Kette von Arbeitsschritten projekt- und fragestellungsunabhängig als Daueraufgabe angelegt, ausreichend ausgestattet und zunehmend standardisiert werden (vgl. MAURER 2013). Zuvorderst zu nennen sind hier die Datengrundlagen der in der Linie für deren Erhebung und Haltung zuständigen Behörden einschließlich Diensten zu deren Datenbereitstellung gefolgt von der Softwarepflege und der turnusmäßigen Modellaktualisierung. Schließlich erhöhen Datenbereitstellungsdienste für Modellergebnisdaten den Service-Level weiter, möglichst in der Zusammenschau mit den relevanten Modelleingangsdaten und der Möglichkeit, darauf basierende weitergehende Analysen und Darstellungen herzustellen.

Vorhersagesysteme für die tägliche Vorhersage wären ohne derartige Umgebungen zur Prä- und Postprozessierung nicht operationell einsetzbar (vgl. MEIBNER & RADEMACHER 2018), aber auch alle anderen Modellierungsdienstleistungen gewinnen durch eine Standardisierung und Automatisierung der Datenverarbeitungs- und Analyseschritte.

Ein Beispiel für einen benutzungsfreundlichen, nutzergruppenspezifischen Dienst zur dauerhaften, schnellen und sicheren Bereitstellung von Daten, Analysen und Analysewerkzeugen der BfG ist der seit 2013 betriebene Fachdienst FLYS, der eingebettet in das Gewässerkundliche Informations- und Analysesystem (GGInA) der BfG als „virtueller Pegel“ dient, d. h. die über das gesamte Abflussspektrum berechneten Wasserspiegellagen aller in Tabelle 1 genannten Gewässerstrecken in der Zusammenschau mit den grundlegenden Modelleingangsdaten der WSV (Querprofile, Wasserspiegelfixierungen, Abflusskurven, etc.) über einen Web-Klienten bereitstellt (vgl. BUSCH 2018b).

Natürlich bedürfen auch derartige „Umgebungsdienste“ analog zu den Modellsystemen und Modellen selbst der kontinuierlichen Pflege und Weiterentwicklung und damit der Ausstattung mit ausreichenden Ressourcen, um sie auf einem bestimmten Niveau aufrechtzuerhalten. Dann leisten sie jedoch einen Beitrag zu Qualitätssicherung, Reichweite und Reputation der sie gewährleistenden Institutionen.

5 Zukunft der Modellierung

In einer Zeit, in der der gesellschaftliche Anspruch zu sein scheint, dass „Alles“ immer und überall vorhanden und gleichzeitig alle negativen Auswirkungen davon entsprechend ferngehalten sein sollen, werden auch die Ansprüche an das Management der Umwelt immer komplexer und feingliedriger. Um überhaupt nur über Grundlagen für ein solches Management zu verfügen, streben wir danach, die Umwelt sowohl messtechnisch als auch modellierend immer vielseitiger und räumlich und zeitlich höher aufgelöst zu überwachen, in ihrem Zusammenspiel zu verstehen und in ihrer weiteren Entwicklung vorzusehen. Der damit verbundene Anspruch weitergehender fachlicher Integration erfordert es, immer komplexere Prozess- bzw. Modellketten über Fachgebiete und Regionen hinweg zu betrachten. Allein um dies technisch handhaben zu können, wird wiederum eine zunehmende technische Integration notwendig. Das heißt, dass Schnittstellen zwischen Daten und Modellen weiter verschlankt und automatisiert werden müssen, um so erhebliche Anteile der routinemäßigen Kommunikation, die heute noch von Mensch zu Mensch oder zwischen Mensch und Maschine erforderlich ist, direkt zwischen Maschinen ablaufen lassen zu können. Die so gewonnene Kapazität an menschlicher Geisteskraft kann dann – so die Hoffnung – in die Analyse der Ergebnisse der weitergehend automatisierten Prozesse investiert werden. Nur so besteht auf Dauer eine Chance, die vielen „Probleme“, die die zunehmenden (und oft widerstreitenden) gesellschaftlichen Ansprüche an die Umwelt mit sich bringen, nein, nicht zu lösen (das scheint zu oft unmöglich), aber vielleicht für die „Probleme“ optimale Kompromisse im Sinne einer Minimierung der Summe aller negativen Auswirkungen finden zu können.

Mögliche Ansatzpunkte gibt es überall dort, wo bisher noch unabhängig voneinander mit gleichen oder ähnlichen Methoden gearbeitet wird, und es sich lohnen könnte, nach Synergieeffekten zu suchen. In der BfG beinhalten z. B. die Modellsysteme QSim für Gewässergütefragen und INFORM für ökologische Wirkungsanalysen sowie das Alarmmodell Elbe (ALAMO) zur Vorhersage von Schadstofftransportereignissen eigenständige hydraulische Modellbausteine bzw. stützen sich auf deren Ergebnisdaten.

Weitere Ansatzpunkte bieten sich überall dort, wo aneinandergrenzende Teilsysteme unabhängig voneinander betrachtet werden, und das jeweils andere Teilsystem möglicherweise unverhältnismäßig vereinfacht bzw. vergrößert als Randbedingung betrachtet oder aber unnötig aufwändig verbunden wird (z. B. technisch veraltet bzw. manuell). Beispielsweise wird innerhalb der BfG in dieser Hinsicht gegenwärtig eine entsprechende nähere Untersuchung der BfG-Modellwelt und des Datenmanagements gestartet. Darüber hinaus bestehen mit den Partnerbehörden, insbesondere der Bundesanstalt für Wasserbau (vgl. SCHMIDT 2018) und dem Deutschen Wetterdienst, Gespräche zur Erörterung von Synergiepotenzialen bzw. zur Verschlinkung von Schnittstellen. Auch auf europäischer Ebene wird mit der Erarbeitung eines Vorschlags für die europäische Forschungsinfrastruktur DANUBIUS an der Fortentwicklung von fachlichen und technologischen Integrationsmöglichkeiten gearbeitet.

Ganz konkret wird in der BfG hinsichtlich der großräumigen hydraulischen Modellierung von Bundeswasserstraßen vermehrt auf den Aufbau und Einsatz von 2D-Modellen gesetzt, die neben dem (angesichts moderner Rechentechnik geringer werdenden) Nachteil höheren Berechnungsaufwands eine Reihe von Vorteilen mit sich bringen, u. a. bessere Ausnutzung heute verfügbarer Datenquellen, höherer Detaillierungsgrad von Gelände und Zustandsvariablen, geringere Anfälligkeit für fehlerhafte Abstraktion (vgl. MAURER 2000).

6 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag schildert ausgehend von der Beratungsaufgabe der Oberbehörde und dem Werkzeugcharakter der Modelle überblicksartig die vielfältigen Einsatzzwecke hydraulischer Modelle für unterschiedliche Auftraggeber und Aufgabengebiete und verweist dabei auf eine Reihe von weiterführenden Beiträgen in diesem Tagungsband. Die gegenwärtig eingesetzte Modelltechnik und der Modellbestand wird erläutert, nicht ohne auf die Notwendigkeit fortlaufender Aktualisierungszyklen aller Arbeitsschritte der Modellaufstellung zu verweisen, möchte man denn deren Einsatzfähigkeit dauerhaft erhalten. Ein Abschnitt über die Erhöhung des Nutzens von Modellen, indem sie in leistungsfähige Modellumgebungen zur Prä- und Postprozessierung eingebettet werden, leitet schließlich direkt weiter zu einem Ausblick auf die mögliche Zukunft der Modellierung ganz allgemein, spezieller in der BfG und konkret für die hydraulische Modellierung.

Literatur

- BUSCH, N. (2018a): Fließgewässermodellierung für Bundeswasserstraßen im Dienst der Gewässerkunde. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 27-41
- BUSCH, N. (2018b): Bereitstellung hydrologischer Grundlagen – Fachdienst FLYS. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 71-83
- ENGEL, H. (2018): Abflussmodellierungen in der BfG von 1968 bis 2006. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 5-16
- HATZ, M. (2018): Einsatz hydraulischer Modelle zur Verbesserung hydrologischer Grundlagen: Homogenisierung der langen HQ-Reihen (1890-2013) für Pegel der Elbe. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 61-70
- HORCHLER, P., A. ANLAUF (2018): Hydraulische Modellierung – eine wesentliche Grundlage für die erfolgreiche integrierte Gewässerentwicklung. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 133-142
- IKSR – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2006): Abschlussbericht: Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein infolge Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser bis 2005. IKSR-Bericht Nr. 153

- IKSR – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2007): Aktionsplan Hochwasser 1995-2005 – Handlungsziele, Umsetzung und Ergebnisse. Broschüre der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins
- IKSR – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2012a): Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein – Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser 1995-2010 einschließlich Vorausschau für 2020 sowie 2020+. IKSR-Bericht Nr. 199
- IKSR – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2012b): Aktionsplan Hochwasser 1995-2010: Handlungsziele; Umsetzung und Ergebnisse – Kurzbilanz. IKSR-Bericht Nr. 200
- MATHAN, C. (2018): Die Bedeutung überregionaler Wirkungsnachweise im Nationalen Hochwasserschutzprogramm (NHWS). In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 84-91
- MAURER, T. (2000): Automatisierte Erstellung von Finite-Elemente-Netzen für die zweidimensionale Strömungssimulation durch problemangepasste Ausdünnung von Rasterdaten der Geländehöhe. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen. Kolloquium am 10. Mai 2000 in Koblenz. Veranstaltungen 3/2000.
- 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, S. 7-16, https://doi.org/10.5675/BfG_Veranst_2013.4
- 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, https://doi.org/10.5675/BfG_Veranst_2017.5
- MEIBNER, D., S. RADEMACHER (2018): Hydraulische Modellierung bei der Wasserstandsvorhersage für Bundeswasserstraßen. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 108-118
- PROMNY, M., N. BUSCH, A. GLEIM, M. HAMMER, R. LEY (2018): Analyse und Optimierung des Elbe-Havel-Systems mithilfe von 2D-Modellierung. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 52-60
- SCHMIDT, A. (2018): Modellierung im Binnenverkehrswasserbau – Routine oder Herausforderung? In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 119-132
- SCHUH, C., M. SCHMID (2018): Einsatz von Modellsystemen im Donaugebiet – Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum NHWS. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 92-100
- YÖRÜK, A. (2018): 2D-Modellierung zur Überprüfung und Verbesserung von Abflusskurven an der Weser. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 42-51



Kontakt:

Dr.-Ing. Thomas Maurer

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261/ 1306 5242

E-Mail: thomas.maurer@bafg.de

Jahrgang: 1963

1982 – 1989

Universität Karlsruhe, Studium des Bauingenieurwesens, Vertiefung Wasserwesen

1991 – 1997

Universität Karlsruhe
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW),
Wissenschaftlicher Angestellter

1998 – 2000

Björnsen Beratende Ingenieure (BCE)

1998 – 1999: Gruppenleiter 2D-Abflussmodellierung

1999 – 2000: kommissarischer Leiter Abteilung
Hydroinformatik

seit 2000

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

2000 – 2005: Leiter Weltdatenzentrum Abfluss
(GRDC)

2006: Referatsleiter „Geoinformation und Fern-
erkundungsverfahren“

seit 2007: Referatsleiter „Wasserhaushalt,
Vorhersagen und Prognosen“

Fließgewässermodellierung für Bundeswasserstraßen im Dienst der Gewässerkunde

Norbert Busch

1 Einleitung

Die Erstellung großräumiger mathematischer Abflussmodelle für Bundeswasserstraßen (BWaStr) und ihr Einsatz zur Ermittlung und Verbesserung hydrologischer Grundlagen zählen zu den Kernkompetenzen und Kernaufgaben der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Messdaten an den von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) entlang der BWaStr betriebenen Pegeln liefern unverzichtbare Basisdaten für vielfältige Aufgabenwahrnehmungen der WSV und insbesondere für die Kalibrierung mathematischer Abflussmodelle. Diese mit hoher Genauigkeit kontinuierlich gemessenen Wasserstände beschreiben die lokale hydrologische Situation. In Ergänzung dazu wird heute erwartet, dass mit ebensolcher Akkuratess für jeden beliebigen Ort an den BWaStr und für jeden denkbaren Abfluss mit numerischen Modellen nach Stand des Wissens und der Technik Informationen zu Wasserstands- und Strömungsverhältnissen ermittelt und bereitgestellt werden. Dies stellt gleichermaßen hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit von aktuellen Modellen und an die hydraulischen Modellierer. Prinzipiell sollten 1D-/2D-Modelle weitgehend physikalisch fundiert sein, die Abflussentwicklung im Gewässerverlauf verifizieren und die ggf. durch Bauwerke beeinflussten Durchflussverhältnisse naturgemäß beschreiben, so dass die Modelle auch prognostisch aussagefähig sind. Die Modellierer müssen in der Lage sein, mit ihren Instrumenten, ihrem Wissen und ihrer Erfahrung komplexe Zusammenhänge im Fließgeschehen verständlich darzustellen. Nur so kann den Ansprüchen der WSV, der verschiedenen Fachdisziplinen der BfG (z. B. Gewässermorphologie und Ökologie) und wechselnder Projektpartner dauerhaft entsprochen werden.

Nachfolgend wird die sich im Laufe der Zeit etablierte strategische und thematische Ausrichtung des Aufgabengebiets „Fließgewässermodellierung“ näher erläutert (Kapitel 2). Danach wird in Kapitel 3 der aktuelle Bestand an 1D- und 2D-Modellen für BWaStr vorgestellt. Ausgewählte Beispiele von Abflussmodellierungen aus der jüngeren Zeit (Kapitel 4), die stellvertretend für die in Kapitel 2 vorgestellten, priorisierten Themenfelder stehen, dienen als Beleg für die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser numerischen Modelle in der Hydrologie. Den Abschluss dieses Beitrags bilden die Zusammenfassung und ein Ausblick, wie den Herausforderungen zukünftiger Entwicklungen in der Gewässerkunde unter Einbezug der hydraulischen Abflussmodellierung begegnet werden könnte (Kapitel 5).

2 Ausrichtung des Aufgabengebiets „Fließgewässermodellierung“

Hydraulische Abflussmodelle für BWaStr werden in bzw. im Auftrag der BfG seit 50 Jahren entwickelt und für unterschiedliche Zielsetzungen eingesetzt (ENGEL 2018, MAURER 2018). Zu allen Zeiten haben seither, wie in anderen Wissenschaftsdisziplinen der BfG, auch im Aufgabengebiet „Fließgewässermodellierung“ die Personalressourcen den Gestaltungsrahmen hinsichtlich der Erstellung und des Einsatzes mathematischer Modelle vorgegeben. Umso wichtiger ist es, Projekte und Untersuchungen nach bestimmten Grundsätzen auszurichten, die zum einen realistische Aussichten auf Erfolg ermöglichen und zum anderen auch vielversprechende Entwicklungskorridore eröffnen. Dabei steht dem ingenieurmäßigen Ansatz folgend immer die Orientierung auf konkrete Produkte im Fokus. Strategisch waren/sind die Aktivitäten in der „Fließgewässermodellierung“ nach den folgenden Vorgaben ausgerichtet:

- > Modellgestützte Beratungsleistungen für die hydrologischen Dienststellen der WSV haben höchste Priorität. Unabhängig von ihrer Bedeutung für die Schifffahrt werden alle BWaStr als gleichermaßen wichtig angesehen. Eine Zusammenarbeit mit den Bundesländern, Flussgebietsgemeinschaften, internationalen Kommissionen oder sonstigen Partnern (bei Erstattung der Kosten) liegt im Interesse der BfG, wenn bisherige Modellinstrumentarien sich hierdurch verbessern bzw. erweitern lassen und die eigene Expertise über das Gewässer oder die Modelltechnik wächst. Im gleichen Sinne gilt dies für hydrologische Daten.
- > Untersuchungen und Projekte werden unter dem Aspekt initiiert und in ihren Inhalten und Zielen so formuliert, dass sie vorrangig zu verbesserten hydrologisch-hydraulischen Erkenntnissen für BWaStr und insgesamt zu einem besseren Prozess- und Systemverständnis führen (BUSCH et al. 2016). Die Grundlagenforschung liegt nicht prioritär im Fokus dieser wissenschaftlich-technischen Untersuchungen.
- > Die Erstellung und der Einsatz hydraulischer 1D-/2D-Modelle erfolgt ausschließlich nach Stand des Wissens und der Technik. Dies ist seit jeher gelebte Praxis in der „Fließgewässermodellierung“ und entspricht dem Selbstverständnis der BfG als unabhängiges, wissenschaftliches Institut des Bundes auf dem Gebiet der Hydrologie. Abhängig von der Aufgabenstellung ergeben sich die gewählte Modellart und der Detaillierungsgrad. Grundsätzlich sollten die erstellten Modelle weitgehend physikalisch fundiert und somit prognosefähig sein, überall belastbare Aussagen für das gesamte Abflussspektrum garantieren sowie stationär und instationär das hydrologisch-hydraulische Geschehen abbilden. Auf eine Plausibilisierung der Ergebnisse, Dokumentation, Qualitätssicherung und zeitgemäße Wissensverbreitung (z. B. im Fachdienst FLYS der BfG) wird großer Wert gelegt.
- > Unter Modellierern ist der Grundsatz „garbage in – garbage out“ (Müll rein – Müll raus) geläufig. Er wird aber nicht immer im erforderlichen Maße beachtet. Dabei können Modellergebnisse nie besser als die verwendete Datenbasis (Geobasisdaten und hydrologische Fachdaten) sein. Das Bemühen um eine aktuelle und konsistente Datenbasis seitens der Modellierer ist ein nahezu fortwährender Kampf, der trotz gelegentlicher Rückschläge immer wieder aufgenommen und geführt werden muss. Beispielsweise wurde das erste im Referat „Geodäsie“ der BfG erstellte Digitale Geländemodell des Wasserlaufs (DGM-W) auf Initiative der „Fließgewässermodellierung“ für die BWaStr Saar erstellt, um einen Auftrag der WSV im Zusammenhang

mit dem Ausbau der Saar zur Großschifffahrtsstraße erfolgreich zu erfüllen (BfG 2008). Gegenwärtig laufen Anstrengungen zur Aktualisierung des veralteten, aus dem Jahr 2006 stammenden DGM-W der Elbe. Auf Basis eines qualitativ hochwertigen Bestands an neuen Geobasisdaten ließe sich ein deutlich verbessertes Elbmodell entwickeln.

- > Es ist eine Illusion zu glauben, dass jemals ein Projekt wie ursprünglich geplant und vertraglich vereinbart durchgeführt wurde. Vor Unwägbarkeiten ist man nie gefeit, weshalb im Projektverlauf immer eine Bereitschaft zur Flexibilität bei den beteiligten Projektpartnern von Nöten ist, um zudem neuen Ideen eine Chance zu geben. Neupriorisierungen aufgrund zwischenzeitlich gewonnener Erkenntnisse sind bei vertrauensvoller Zusammenarbeit ein probates Mittel zum Projekterfolg. Ein sichtbares Zeichen für den Erfolg ist gegeben, wenn die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse Anlass zu weiteren Untersuchungen geben.
- > Die in Projekten erworbene Expertise ist im hohen Maße personengebunden und im Bereich des mathematischen Modellwesens nur bedingt übertragbar. Aus diesem Grunde wird bei fortbestehenden Personalengpässen angestrebt, befristet eingestelltes Projektpersonal für nachfolgende Projekte lückenlos weiter zu beschäftigen und perspektivisch in unbefristete Arbeitsverhältnisse zu übernehmen. Hierdurch könnten die derzeit in Personalakquise gebundenen Ressourcen wieder in fachliche Arbeiten investiert werden.

Im Laufe der vergangenen Jahrzehnte haben sich in der „Fließgewässermodellierung“ vier Themenfelder herausgebildet und etabliert. Diese sind:

- 1) Großräumige Abflussmodellierung (1D/2D) an BWaStr zur Ermittlung von hydrologischen Grundlagen und Beschreibung des gewässerkundlichen Ist-Zustands (siehe Erlass BMVBS 2008)
- 2) Entwicklung und Betrieb des Online-Fachdienstes FLYS der BfG als nachhaltiges Informations- und Analyseinstrument für Hydrologie, Morphologie und Ökologie an BWaStr („virtueller Pegel“) mit Zugriff auf Ergebnisse hydraulischer 1D-/2D-Modellierungen und Messdaten
- 3) Regionale bzw. überregionale Abflussmodellierung (1D/2D) und flankierende Untersuchungen an BWaStr zur Überprüfung und Verbesserung von hydrologischen Grundlagen bzw. systemischen Zusammenhängen
- 4) Hydrodynamische Abflussmodellierung (1D) auf Einzugsgebietsebene zum Nachweis der Auswirkungen von natürlichen und anthropogen bedingten Veränderungen auf Hochwasser (nur mit Partnern)

In Kapitel 4 werden für diese thematische Ausrichtung Beispiele aus jüngerer Zeit vorgestellt.

3 Aktueller Bestand an 1D- und 2D-Modellen für BWaStr

Durch zahlreiche Projekte im Auftrag der WSV oder im Rahmen der Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Partnern wurde in der „Fließgewässermodellierung“ zwischen 2006 und 2018 der Bestand an 1D- und 2D-Modellen für BWaStr erheblich ausgedehnt. Abbildung 1 zeigt alle Strecken an BWaStr, für die aktuell bzw. im Laufe des Jahres 2018 einsatzbereite 1D- bzw. 2D-Modelle für Modellierungen vorliegen.

Alle 1D-hydraulischen Modelle basieren auf der Software SOBEK, die 2D-hydraulischen Modelle auf der Software Delft-3D. Diese beiden Softwareprodukte wurden von Deltares/NL entwickelt, für die die BfG Lizenzen zur Nutzung erworben hat. Eine grundsätzlich zu befürwortende vergleichende Suche nach anderen, möglicherweise noch geeigneteren Softwaresystemen ist mit der derzeit vorhandenen Personalsituation nicht leistbar. Deshalb und wegen der langjährigen bewährten Kooperation mit Deltares werden derzeit alle Modelle einheitlich mit deren Softwareprodukten erstellt.

In unterschiedlicher Aktualität und Diskretisierung berücksichtigen diese Modelle die Geometrie, den Ausbaugrad der Gewässer und der angrenzenden Vorländer. Mehrheitlich beschreiben sie die Situation zwischen 2000 und 2010. Für alle Modelle existieren umfangreiche Dokumentationen, in denen detaillierte Angaben zum Modellaufbau und zur Modellgüte aufgeführt sind.



Abb. 1: Bestand an 1D- und 2D-hydraulischen Modellen für BWaStr in der BfG (Stand: 2018)

Insgesamt umfassen die 1D-Modelle für BWaStr Gewässerstrecken mit einer Gesamtlänge von 3.300 km (Abb. 1). Dabei entfallen auf den Rhein und seine Nebenflüsse Modellstrecken von 1.752 km Länge, auf die Weser und ihre Quellflüsse Modellstrecken von 229 km Länge,

auf die Elbe und ihre Nebenflüsse Modellstrecken von 742 km Länge, auf die Oder eine Modellstrecke von 162 km Länge sowie auf die Donau (inkl. Landesstrecke) von 380 km Länge. Das 1D-Modell des staugeregelten Oberrheins (ca. 170 km Länge) mit seinen komplexen Bauwerkssteuerungen wird voraussichtlich Ende des Jahres 2018 verfügbar sein. Gegenwärtig existiert in Deutschland noch kein numerisches Modell, das das Abflussgeschehen des Rheins zwischen Basel und Iffezheim komplett abbildet. Fazit: Die „Fließgewässermodellierung“ kann nahezu für das gesamte deutsche Binnenwasserstraßennetz für vielfältige Zwecke 1D-hydraulische Modelle einsetzen. Diese müssen der jeweiligen Gewässerentwicklung entsprechend aktuell gehalten und angepasst werden.

Auch in näherer Zukunft sollen für die großräumige Abflussmodellierung an BWaStr gewässerumfassend und gewässerübergreifend weiterhin 1D- und, soweit erforderlich und performant, auch 2D-Modelle aufgebaut werden und für hydrologische Zwecke zum Einsatz kommen. Gegenwärtig bzw. Ende 2018 umfassen die 2D-Modelle an der Elbe zwischen Tangermünde und Geesthacht und an der Havel unterhalb von Berlin eine Gewässerstrecke von 376 km Länge, das jüngst fertiggestellte 2D-Modell der Weser zwischen Hann. Münden und Bremen umschließt eine Modellstrecke von ca. 360 km Länge.

4 Beispiele für Themenfelder mit großräumiger Abflussmodellierung in jüngerer Zeit

Die „Fließgewässermodellierung“ der BfG wurde im Laufe der Zeit aufgrund ihrer breiten thematischen und grundsätzlichen Ausrichtung zu einem gefragten Partner für gewässerkundliche Dienststellen der WSV, der Bundesländer sowie für diverse Fachdisziplinen der BfG. Nachfolgend wird dies anhand einer Auswahl von themenfeldbezogenen Beispielen erläutert.

Beispiel aus Themenfeld 1

Numerische Modelle für BWaStr werden im Allgemeinen von Dienststellen der WSV beauftragt bzw. im Rahmen von Projekten in Zusammenarbeit mit den Bundesländern auf dem Vergabewege erstellt. Für einige der heute weniger bedeutsamen BWaStr wäre der Aufbau mathematischer Abflussmodelle ohne die von den Ländern geleistete, umfangreiche Bereitstellung von Geobasisdaten so nicht möglich gewesen. Die Lahn zählt zu diesen Wasserstraßen. Um im Bereich der Gewässerkunde besser auskunftsfähig zu sein, beauftragte das WSA Koblenz zur Ermittlung hydrologischer Grundlagen ein hydraulisches 1D-Modell der Lahn zwischen Gießen und der Mündung. Die WSV verfügte selbst nur über Pegel- und Bauwerksdaten. Erforderliche Querprofilaten stellte das Land Hessen u. a. bereit und erhielt im Gegenzug die mit dem 1D-SOBEM-Modell berechneten Wasserspiegellagen für kennzeichnende, stationäre Abflusszustände. Hierfür wurde eine Zugangsberechtigung für die Teilnahme am Fachdienst FLYS der BfG erteilt. Das Lahnmodell ist in WL|Delft Hydraulics (2004) und MEIBNER et al. (2005) dokumentiert. Abbildung 2 zeigt die berechnete, stark staubeeinflusste Wasserspiegellage für den mittleren Lahnabfluss.

Das Lahnmodell bildete die Grundlage für spätere Untersuchungen in der BfG. Im Rahmen des von der EU geförderten LIFE-Projekts „LiLa - Living Lahn“ (LiLa) soll ein Entwicklungskonzept für die zukünftige Nutzung der BWaStr Lahn erarbeitet werden, um die Revitalisierung des anthropogen überprägten Flussraums voranzutreiben und die Lahn somit ökologisch aufzuwerten (REEPS & HATZ 2016). Im Zuge der Bestandsaufnahme für das Projekt

sollen die Möglichkeiten einer Staulegung zeitlich vorgezogen betrachtet und auf Basis vorhandener bzw. kurzfristig verfügbarer Daten abgeschätzt werden, ob es Sachzwänge gibt, die den Erhalt oder Teilerhalt von Staustufen notwendig machen (SCHLEUTER 2016).

Das Aufgabengebiet „Fließgewässermodellierung“ wurde vom federführenden ökologischen Referat der BfG gebeten, mit dem Lahnmodell für die stationären Abflusszustände MNQ, MQ, MHQ und HQ₁₀₀ eine kurzfristige, modellbasierte Abschätzung für die sich einstellenden Wasserspiegellagen (Wspl) unter Annahme einer Staulegung/Entfernung aller Wehre zu treffen. Diese ermittelten Wspl sollen u. a. als Grundlage zur Ermittlung von Überschwemmungsgebieten dienen, die dann für weitergehende Auswertungen von ökologischen Zusammenhängen (u. a. Grundwasser, Böden, Vegetation, Fauna) herangezogen werden können. Abbildung 2 zeigt auch die modellierten Wspl für MQ (ohne Wehre) und die resultierenden Wasserstandsdifferenzen im Bezug zum heutigen Zustand der Lahn (mit Wehren). Die Differenzen schwanken lokal zwischen 0 cm und -5,1 m. Sie sind auf den deutlich zu erkennenden Einfluss der Wehre und deren Steuerung (Stauziele) zurückzuführen. Besonders groß fallen die Wasserstandsabsenkungen im Bereich der Wehre Hollerich, Kalkofen und Cramberg aus.

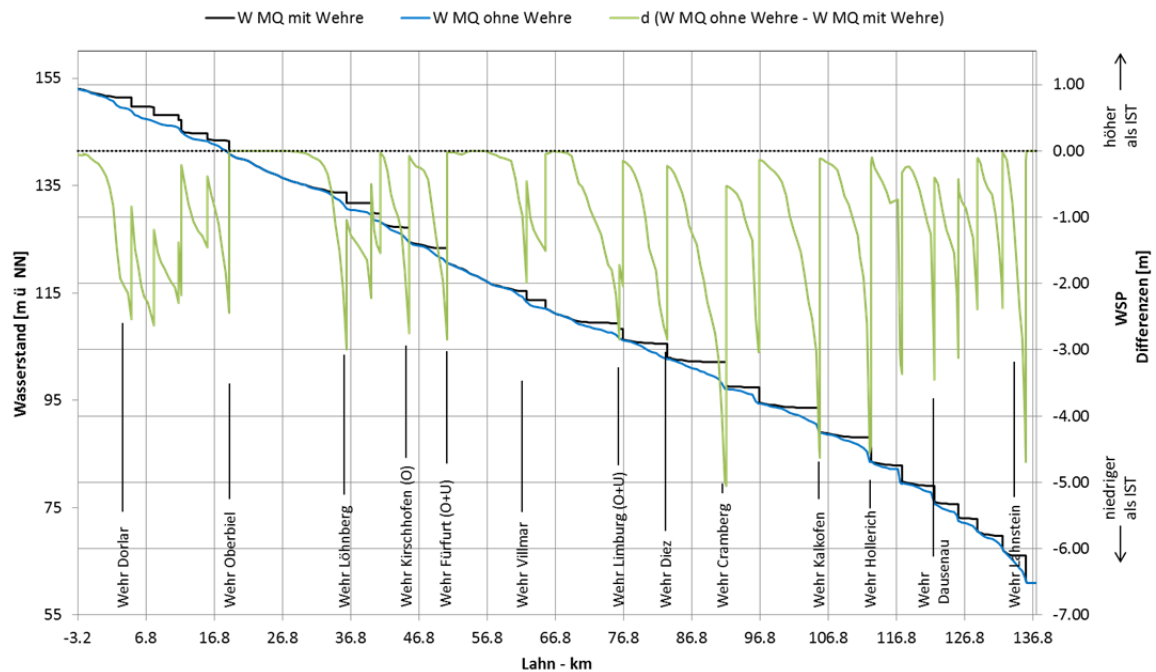


Abb. 2: Berechnete Wasserspiegellage für den mittleren Abfluss (MQ) der Lahn; mit Wehren, ohne Wehre und resultierende Wasserstandsdifferenz (hellgrün); aus REEPS & HATZ (2016)

Beispiel aus Themenfeld 2

Am 1. Juli 2013 wurde der Online-Fachdienst FLYS der BfG eröffnet (BfG 2013a). Hierbei handelt es sich um eine Anwendung im Geoportal GGIInA der BfG, die seither bei den registrierten Teilnehmern überwiegend großen Zuspruch erfahren hat (BUSCH 2018). In mehreren Entwicklungszyklen entstand in Zusammenarbeit mit hydrologischen Dienststellen der WSV seit 1998 ein umfassendes Informations- und Analyseinstrument für die Hydrologie, Morphologie und Ökologie an BWaStr. Im Sinne einer multifunktionalen App kann sich der

Nutzer mit dem Fachdienst FLYS via Geoportal der BfG bei Zugriff auf autorisierte Datensätze und nach Auswahl bekannter und neuer Auswerteroutinen unterschiedliche Informationen für beliebige Standorte an BWaStr ermitteln und analysieren. Im Zugriff des Fachdienstes FLYS liegende Datensätze beinhalten hauptsächlich auf Messungen basierende Geobasis- und hydrologische Geofachdaten, die zum Aufbau der hydraulischen Modelle benötigt werden. Diese haben bereits einen Anteil von 99 % an der gesamten Datenbasis. Durch Zugriff und Auswertung auf die mit den hydraulischen Modellen berechneten Wasserspiegellagen bzw. Fließgeschwindigkeiten (1 %) gibt FLYS für beliebige Standorte an Gewässern Informationen zu Wasserständen im Sinne eines „virtuellen Pegels“. Aktuell können die Nutzer des Fachdienstes FLYS auf Daten für 13 BWaStr zugreifen und diese auswerten. Aufgrund von mehreren Beauftragungen von Dienststellen der WSV werden im Nachgang von 1D- bzw. 2D-Modellierungen gegenwärtig FLYS-Datensätze für den staugeregelten Oberrhein, für die Weser zwischen Hann. Münden und Bremen und für die Donau zwischen Kelheim und Jochenstein zusammengestellt. Entsprechende Freischaltungen dieser Datensätze sind für das Jahr 2018 bzw. für 2019 geplant. Weitere Informationen zum Fachdienst FLYS der BfG sind in BUSCH (2018) enthalten.

Abbildung 3 zeigt ein mit FLYS erstelltes W/Q-Diagramm, in dem für Analysezwecke für den Pegel Hann. Münden/Weser gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen zwischen 2011 und 2015, die aktuell gültige und die vorher gültige amtliche Abflusskurve dargestellt sind. Bemerkenswert sind die stark divergierenden Hochwasseräste der Abflusskurven.

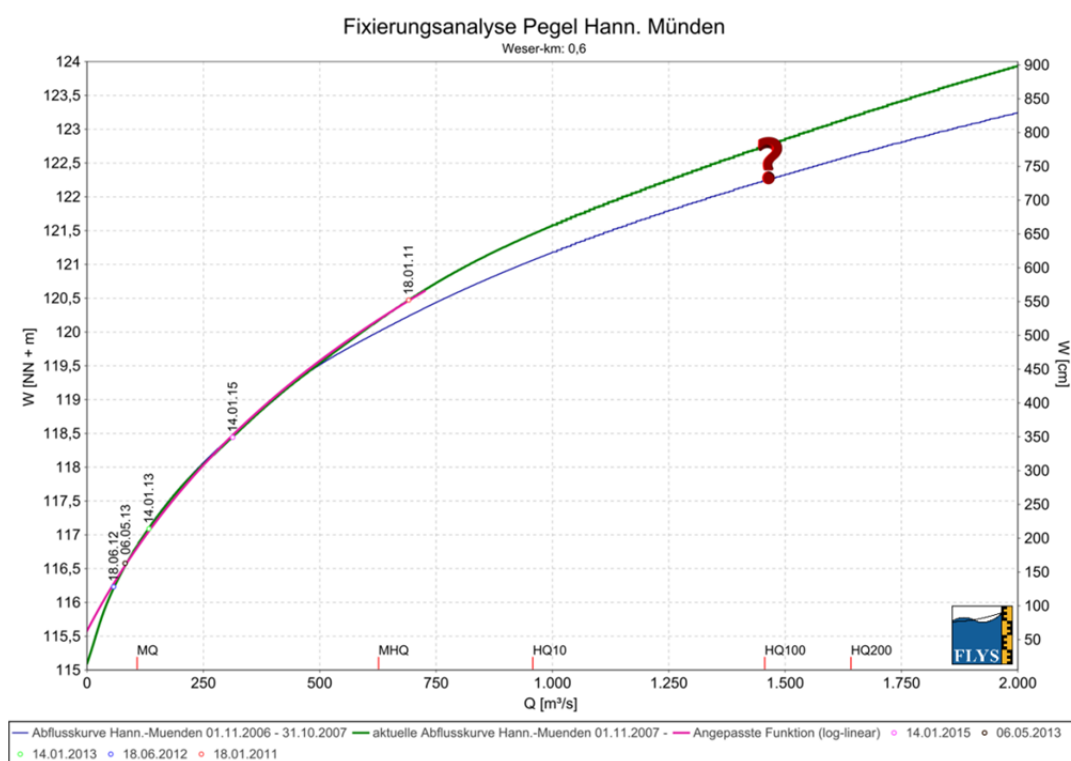


Abb. 3: Berechnete und amtliche Abflusskurven für den Pegel Hann. Münden/Weser und gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen

Beispiele aus Themenfeld 3

In Zukunft wird der Einsatz hydraulischer Modelle zur Überprüfung und Verbesserung hydrologischer Grundlagen insbesondere für Pegel an den BWaStr voraussichtlich erheblich an Bedeutung gewinnen. Benötigt werden hierfür sowohl 1D-Modelle als auch 2D-Modelle. Ein 2D-Modell bildet das angemessene Instrument, das nach aktuellem Wissenstand belastbare Daten zu den lokalen Durchflussverhältnissen liefern kann, um z. B. gültige Abflusskurven für Pegel zu überprüfen und ggf. Stützpunkte für die Ermittlung neuer, verbesserter Abflusskurven zu generieren. Großräumige 1D-Modelle stellen gegenwärtig noch das adäquate Instrument dar, wenn instationäre Auswirkungen von Maßnahmen an Gewässern und im Einzugsgebiet auf Hochwasser auf Flussgebietsebene untersucht werden sollen und noch keine durchgehenden 2D-Modelle vorhanden bzw. performant einsetzbar sind.

Abflusskurven für Pegel bilden neben den dort gemessenen Wasserständen das Rückgrat und somit die wichtigsten Grundlagen der quantitativen Gewässerkunde. Mit hoher Genauigkeit werden zuvorderst mittels Abflusskurven die lokalen Wasserstands-Durchflussverhältnisse beschrieben. Sie werden benötigt, um die gemessenen Wasserstände in Abflüsse umrechnen und darauf basierend u. a. primärstatistische Auswertungen durchführen zu können. Am Verlauf der aktuell gültigen Abflusskurve (ab 01.11.2007) und der Vorgängerkurve für den Pegel Hann. Münden in Abb. 3 ist zu erkennen, dass für Hochwasserabflüsse der Weser die Wasserstände am Pegel teilweise über 50 cm angestiegen sind. Da die gültige Kurve in diesem Abflussbereich extrapoliert ist, stellt sich die Frage, ob sich die Durchflussverhältnisse hier tatsächlich so sprunghaft verschlechtert haben. Es ist anzunehmen, dass die Hochwasseräste der extrapolierten Kurven mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Deshalb wurde die BfG vom zuständigen WSA Hann. Münden beauftragt, die aktuell gültigen Abflusskurven aller Pegel an der Weser, mit einem zu erstellenden 2D-Modell der gesamten Binnenweser, in den extrapolierten Hochwasserästen zu überprüfen und ggf. neue Abflusskurven vorzuschlagen. Ergebnisse dieser Modellierungen sind in YÖRÜK (2018) beschrieben.

Ein weiteres Beispiel mit Einsatz großräumiger hydraulischer Modelle der BfG umfasst das breitgefächerte Thema zum Nachweis der Wirkungen von Maßnahmen auf den Hochwasserablauf. Nicht nur bei den vom Hochwasser betroffenen Anliegern, sondern in kollektiver Erinnerung ist das extreme Elbehochwasser vom August 2002, in dessen Verlauf mehrere Menschen in Tschechien und Deutschland ihr Leben verloren und immense Schäden hervorgerufen wurden. Abbildung 4 (Bild oben) zeigt Teile der überschwemmten Altstadt in Dresden und das Querprofil bei Elbe-km 55,7 (Bild unten). Hiermit wird illustriert, dass der neue, lokale Hochwasserschutz unwirksam gewesen wäre, wenn die vorgenommenen Rückhaltungen in tschechischen Talsperren mit Scheitelabsenkungen von ca. 70 cm in Dresden nicht erfolgt wären.

Die deutsch-tschechischen Untersuchungen im EU-Interreg Projekt LABEL und aufgrund eines Auftrags des BMUB haben anhand der untersuchten Hochwasser vom August 2002, April 2006, Januar 2011 und Juni 2013 klar gezeigt, dass die deutschen Anlieger der Oberen und Mittleren Elbe in erheblichem Maße Nutznießer von durchgeführten Rückhaltungen der Oberlieger in Tschechien und Thüringen sind. Ermittelte Scheitelminderungen bis zu mehreren 100 m³/s bzw. mehreren Dezimetern sind ereignisabhängig möglich (IKSE 2012, BfG 2012, 2013b). Genauso offensichtlich ist, dass die aus Scheitelabflüssen zusammengesetzten langen Reihen der Jahreshöchstwerte (1890-2013) für die deutschen Elbepegel (Dresden,

Torgau, Barby, usw.) durch den Betrieb der Talsperren in Thüringen (ab 1932) und der wichtigsten Talsperren in Tschechien (ab 1960) Brüche aufweisen und aus hydrologischer Sicht als inhomogen zu bewerten sind. Sie sollten in dieser Zusammensetzung nicht weiter für extremwertstatistische Untersuchungen verwendet werden. Stattdessen sind die Werte untereinander vergleichbar zu machen, d. h. zu homogenisieren.

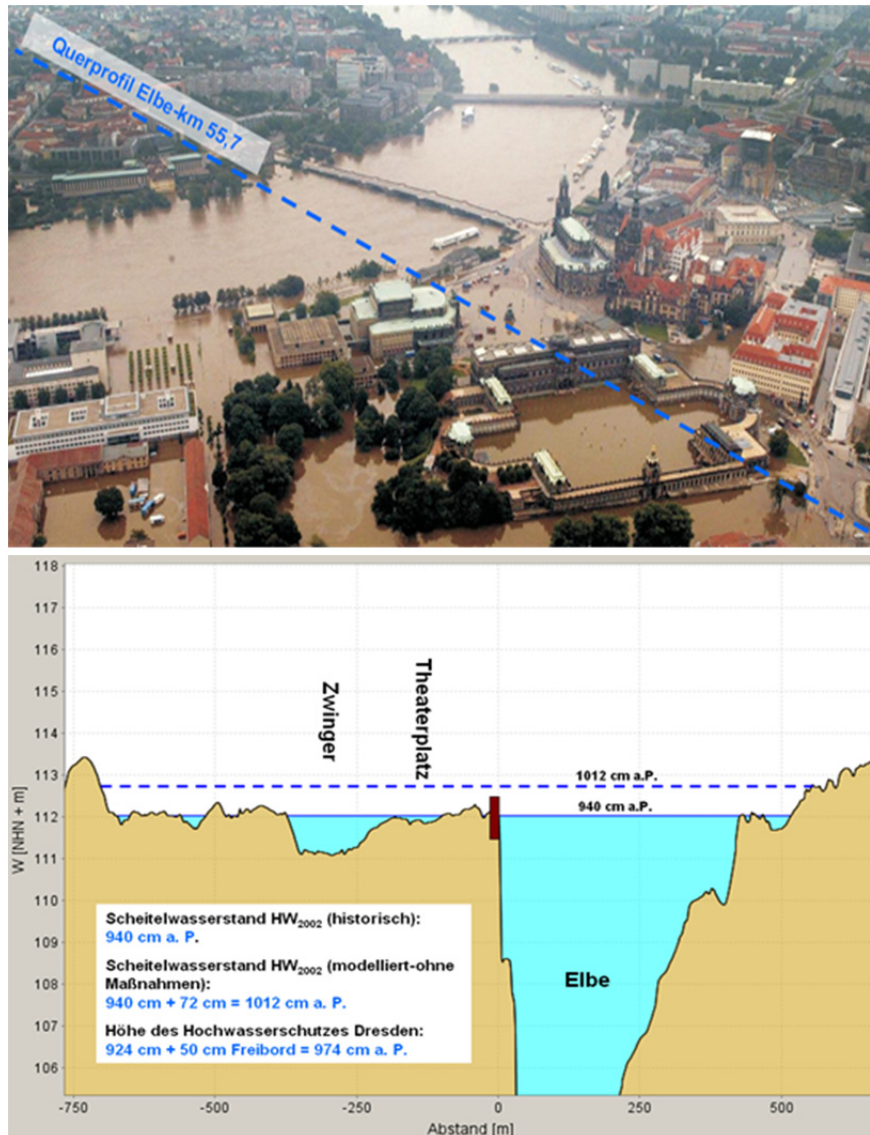


Abb. 4: Scheitelwasserstände (beeinflusst und unbeeinflusst) für das Hochwasser 2002 am Elbe-km 55,7 in Dresden (Foto: IKSE, Querprofil: FLYS 2012)

Auf Initiative mehrerer norddeutscher Elbeanliegerländer haben die Flussgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) und die BfG im Mai 2013 einen Kooperationsvertrag über die Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes „Homogenisierung von langen HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel“ abgeschlossen. Hierin wird u. a. vertraglich vereinbart, die vorliegenden Pegelreihen unter Zuhilfenahme mathematischer Abflussmodelle mit/ohne Einsatz tschechischer und Thüringer Talsperren zu homogenisieren und dann als Grundlage einer aktualisierten Extremwertstatistik zu verwenden. Mittlerweile konnte dieses umfangreiche hydraulisch-statistische Projekt zur Verbesserung hydrologischer Grundlagen

für deutsche Elbepegel erfolgreich abgeschlossen werden (BfG 2018, HATZ 2018). Auf Basis der homogenisierten HQ-Reihen und Extremwert-statistischen Berechnungen in der BfG beabsichtigt die FGG Elbe, für die bedeutenden Pegel an der Elbe aktualisierte statistische Werte für extreme Hochwasser HQ_T festzulegen und einzuführen.

Beispiel aus Themenfeld 4

Modellgestützte Untersuchungen zum Nachweis der Auswirkungen von Maßnahmen auf Hochwasser (regional/überregional) bilden den Hintergrund des letzten Beispiels in der Aufzählung von Projekten priorisierter Themen. Derartige arbeitsintensive Modellierungen werden, da der Hochwasserschutz im Fokus dieser Untersuchungen steht, nur in Zusammenarbeit und anteiliger Kostenträgerschaft mit Bundesländern oder anderen nationalen bzw. internationalen Partnern durchgeführt.

Die Ermittlung von Auswirkungen realisierter bzw. geplanter Polder und Deichrückverlegungen (DRV) auf Hochwasser an Rhein und Elbe waren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen mit großräumigem Modelleinsatz (BfG 2006, IKS 2012). Gezielt können für Rückhalte Zwecke durch die gesteuerte Füllung von Speicherräumen in Talsperren und Poldern Hochwasserscheitel wirksam gekappt werden. In der unterhalb dieser Maßnahmen gelegenen Gewässerstrecke wird hierdurch den Hochwasserwellen das zurückgehaltene Volumen temporär entzogen, und in Abhängigkeit von der Hochwassergenese können diese Maßnahmen somit auch überregional scheitelabsenkend wirksam sein, wie das zweite Beispiel aus Themenfeld 3 zeigt. Für entsprechende großräumige Untersuchungen stehen in der BfG 1D-Modelle zur Verfügung. Im Gegensatz hierzu wird durch Deichrückverlegungen dem Gewässer wieder mehr Raum für Überschwemmungen gegeben, der danach wieder an der Dynamik der Wasserstandsschwankungen des Gewässers teilnehmen kann. Durch die zurückgewonnenen Volumina ändert sich in geringem Maße das Retentionsverhalten des Gewässerabschnitts infolge einer geringen zeitlichen Umverteilung von Abflüssen im Hochwasserablauf. In der Regel werden nur unmerkliche Auswirkungen auf die Hochwasserwellen in der unterhalb gelegenen Gewässerstrecke verursacht. Wenn die durch DRV geschaffenen Räume bei Hochwasser mehr oder weniger durchflossen werden, können diese aufgrund der vergrößerten Fließquerschnitte im Streckenbereich der Maßnahme und oberhalb davon deutliche Scheitelwasserstandsabsenkungen hervorrufen. Dies war beispielsweise beim extremen Elbehochwasser im Juni 2013 durch die im Jahre 2009 fertiggestellte DRV Lenzen in Brandenburg der Fall (BfG 2014).

Abbildung 5 zeigt die Elbe und die überschwemmte Aue im Bereich der DRV Lenzen beim Hochwasser 2013. Durch Abflussmessungen im Verlaufe des Hochwassers wurde festgestellt, dass durch die Öffnung des geschlitzten Deichs (unten rechts; Abb. 5) fast $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ in die wiedergewonnene Aue hineinflossen. Da der Abfluss der Elbe zum Messzeitpunkt kurz nach dem Scheiteldurchgang ca. $3.500 \text{ m}^3/\text{s}$ betrug, entspricht der anteilige Abfluss über die zurückgewonnenen Überschwemmungsgebiete der DRV Lenzen ca. 30 % des Elbeabflusses (BAW 2013, BfG 2015).

In Zusammenarbeit mit den Anliegerländern an der unteren Mittel Elbe hat die BfG ein 2D-Modell der Elbestrecke von Wittenberge bis Geesthacht erstellt, um verschiedenartige abflussverbessernde Maßnahmen der Länder auf Hochwasser zu untersuchen (BfG 2015). Eine zusätzliche Validierung des Modells wurde anhand von Fließgeschwindigkeiten, die beim Hochwasser 2013 im Einlaufbereich der DRV Lenzen gemessen wurden, durchgeführt.



Abb. 5: Überschwemmte Aue im Gebiet der Deichrückverlegung Lützen/Elbe während des Hochwassers 2013 (Foto: Frank Meyer/RANA)

Trotz erkennbarer Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Geschwindigkeitskomponenten konnte insgesamt eine gute Übereinstimmung erzielt werden. In Abb. 6 ist für den Scheitelabfluss des Hochwassers im Juni 2013 ($Q=4.250 \text{ m}^3/\text{s}$) die modellierte Wasserspiegeldifferenz aus den Zuständen mit und ohne DRV Lützen dargestellt. Sie beträgt im Maximum bis zu 49 cm am oberstromigen Einlauf zum zurückgewonnenen Überschwemmungsgebiet. Rechnerische Auswirkungen dieser Maßnahme sind bis über den Pegel Wittenberge hinaus feststellbar. Diese berechneten Absenkungen werden in hohem Maße durch die Differenzwasserspiegellage aus den Wasserspiegelfixierungen der Hochwasser von Juni 2013 (mit DRV Lützen) und April 2006 (ohne DRV Lützen) bestätigt, die auch in Abb. 6 dargestellt ist. Im Rahmen dieses Projekts wurden insgesamt 25 Engstellen zwischen Wittenberge und Geesthacht identifiziert (BfG 2015). Gegenwärtig wird mit dem Modell untersucht, ob bzw. in welchem Maße hier weitere Verbesserungen der Hochwassersituation möglich sind.

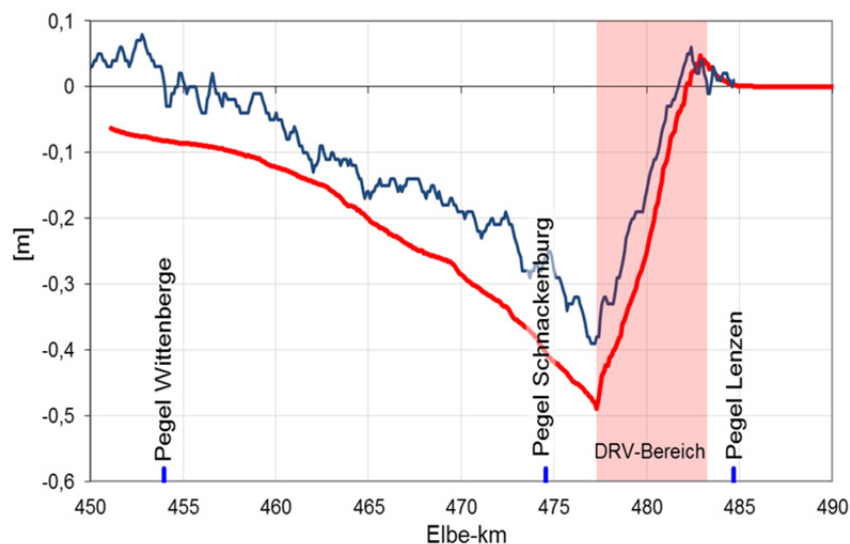


Abb. 6: Berechnete Wasserspiegeldifferenz für das HW 2013 (rot) zwischen den Pegeln Wittenberge und Lützen (mit/ohne DRV Lützen) und Differenzen (blau, Differenz am Pegel Wittenberge auf Null gesetzt) aus gemessenen Wasserspiegellagen der HW 2013 (mit DRV Lützen) und HW 2006 (vor DRV Lützen)

Vergleichbar mit der Situation im Rheingebiet nach den beiden bedeutsamen Hochwassern von 1993 und 1995, demzufolge der IKSr eine koordinierende Rolle in Hochwasserfragen zugewiesen wurde und mithilfe von Fördermitteln aus dem EU-Interreg Programm IRMA Maßnahmen im Rheingebiet zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes finanziert wurden, entstand nach den verheerenden Hochwassern an Donau und Elbe (2013) das gemeinsam von Bund und Ländern getragene Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP). Es wurde auf der Umweltministerkonferenz am 24. Oktober 2014 verabschiedet (BUSCHHÜTER et al. 2018). Im NHWSP übernimmt der Bund die koordinierende Rolle und finanziert anteilig prioritäre Maßnahmen der Bundesländer (Deichrückverlegungen und Polder), von denen eine überregionale Wirkung auf Hochwasser erwartet wird. Zur wissenschaftlichen Begleitung des NHWSP läuft seit Oktober 2015 in der BfG ein über vier Jahre konzipiertes Forschungsvorhaben zum Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen in den Einzugsgebieten von Donau, Rhein und Elbe (MATHAN 2018). Die Modellierung dieser Maßnahmen im Donauegebiet wird beispielhaft von SCHUH & SCHMID (2018) beschrieben. Aufgrund mehrerer bilateraler Verträge mit Bundesländern an der unteren Mittelbe werden gegenwärtig in der BfG mit 2D-Modellen der Elbe (ab Tangermünde) und der Havel (ab Berlin) Maßnahmen des NHWSP vertieft untersucht, um optimierte Wirkungen auf Hochwasser der Elbe zu erzielen (PROMNY et al. 2018).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit ihrem großen Bestand an einsetzbaren großräumigen 1D- und 2D-hydraulischen Modellen für BWaStr ist die „Fließgewässermodellierung“ der BfG zu einem gefragten Partner von gewässerkundlichen Dienststellen der WSV und der Bundesländer geworden. Bewährt hat sich die thematische Ausrichtung dieses Aufgabengebiets, modellgestützt hydrologische Grundlagen an BWaStr zu ermitteln, zu überprüfen ggf. zu verbessern und Daten von übergeordnetem gewässerkundlichen Interesse nachhaltig über den Fachdienst FLYS der BfG bereitzustellen. Um diese Modelle zu pflegen und gezielt weiterzuentwickeln, bedarf es in Zukunft großer Aufwendungen und eines dauerhaft angemessenen Personaleinsatzes.

Da Wasserstände, Überschwemmungsgebiete und die Strömungsverhältnisse wichtige lebensraumbestimmende, abiotische Größen in und an Gewässern darstellen, müssen diese auch ökologisch bedeutsamen Größen insbesondere im Rahmen von Untersuchungen zu ökologischen Entwicklungspotenzialen an BWaStr überall mit großer Genauigkeit bekannt sein und sollten mit qualitativ hochwertigen Modellen ermittelt werden. Deshalb sind in Zukunft bei Modellneuerstellungen im Hinblick auf die Beschreibung des gewässerkundlichen Ist-Zustands grundsätzlich 2D-Modelle zu favorisieren. Hierbei ist auf deren Nachnutzung zu achten und die Kopplung mit Modellen anderer Wissenschaftsdisziplinen anzustreben.

Der bundesweit genutzte Fachdienst FLYS der BfG ist nutzerorientiert auf Basis eines umfassenden Konzepts zu konsolidieren und weiterzuentwickeln.

Im FuE-Vorhaben zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm sollte der Bund neben seiner koordinierenden, in Zukunft verstärkt auch eine gestalterische Rolle anstreben und ausüben.

Literatur

- BAW – Bundesanstalt für Wasserbau (2013): Die Deichrückverlegung bei Lenzen an der Elbe; BAWMitteilungen Nr. 97
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2006): Modellgestützter Nachweis der Auswirkungen von geplanten Rückhaltemaßnahmen in Sachsen und Sachsen-Anhalt auf Hochwasser der Elbe, Bericht BfG-1542
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2008): Neufestlegung der gesetzlichen Überschwemmungsgrenzen an der Saar, Teil II: Berechnung und Darstellung der Überschwemmungsgrenzen an der Saar, Bericht BfG-1433
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2012): Bewertung von Einflüssen tschechischer und Thüringer Talsperren auf Hochwasser an Moldau und Elbe in Tschechien und Deutschland mittels Einsatz mathematischer Abflussmodelle, Bericht BfG -1725
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013a): FLYS goes WEB: Eröffnung eines Hydrologischen Fachdienstes in der BfG, Kolloquium am 15./16. Mai 2013 in Koblenz. Veranstaltungen 4/2013
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013b): Kurzbericht Wirkungen von Deichbrüchen, von gesteuerten und ungesteuerten bestehenden Rückhaltungen sowie von geplanten Maßnahmen auf das Hochwasser im Mai/Juni 2013 an der Elbe, unveröff.
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse; In: Mitteilungen, Nr. 31
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2015): 2D-Modellierungen an der unteren Mittel-Elbe zwischen Wittenberge und Geesthacht; Bericht BfG-1848
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2018): Homogenisierung der HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren; Bericht BfG-1938, in Vorbereitung
- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2008): Erlass vom 23.01.2008, Az.: WS13/WS14 14/02.50/10 (unveröff.)
- BUSCH, N., M. HATZ, M. HAMMER, M. PROMNY (2016): Aus der Vergangenheit lernen, für die Zukunft vorbereitet sein – 10 Jahre Hydrodynamische Abflussmodellierung in der BfG zur Verbesserung hydrologischer Grundlagen, In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 37, Beiträge zum Tag der Hydrologie am 17./18. März 2016 in Koblenz, S. 19
- BUSCH, N. (2018): Bereitstellung hydrologischer Grundlagen – Fachdienst FLYS. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 71-83
- BUSCHHÜTER, E., A. VAN DILLEN, K. MENN, R. PAAS (2018): Das Nationale Hochwasserschutzprogramm. In: NATUR UND LANDSCHAFT, 93. Jahrgang, Heft 2, S. 50-53
- ENGEL, H. (2018): Abflussmodellierungen in der BfG von 1968 bis 2006. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 5-16
- HATZ, M. (2018): Einsatz hydraulischer Modelle zur Verbesserung hydrologischer Grundlagen: Homogenisierung der langen HQ-Reihen (1890-2013) für Pegel der Elbe. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 61-70

- IKSE – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2012): Abschlussbericht über die Erfüllung des „Aktionsplan Hochwasserschutz Elbe“ 2003-2011, Magdeburg
- IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2012): Aktionsplan Hochwasser 1995-2010: Handlungsziele; Umsetzung und Ergebnisse Kurzbilanz, Bericht Nr. 200
- MATHAN, C. (2018): Die Bedeutung überregionaler Wirkungsnachweise im Nationalen Hochwasserschutzprogramm (NHWSP). In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 84-91
- MAURER, T. (2018): Abflussmodellierung in der BfG heute. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 17-26
- MEIBNER, D., N. BUSCH, D. SCHWANENBERG (2005): Hydrologische Erschließung der Bundeswasserstraße Lahn von Gießen bis zur Mündung. Wasserwirtschaft, 95. Jahrgang, Heft 4
- PROMNY, M., N. BUSCH, A. GLEIM, M. HAMMER, R. LEY (2018): Analyse und Optimierung des Elbe-Havel-Systems mithilfe von 2D-Modellierung. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 52-60
- REEPS, T., M. HATZ (2016): Kurzdokumentation Modellbasierte Szenarienberechnungen zur Abschätzung der Wasserspiegellagen für MNQ, MQ, MHQ und HQ₁₀₀ bei potentieller „Entfernung“ der Wehre an der Bundeswasserstraße Lahn, unveröff.
- SCHLEUTER, M. (2016): Diskussionspapier zur kurzfristigen Datenbereitstellung im LiLa-Projekt, unveröff.
- SCHUH, C., M. SCHMID (2018): Einsatz von Modellsystemen im Donaugebiet – Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum NHWSP. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 92-100
- WL|Delft Hydraulics (2004): SOBEK Modellierung für Nebenflüsse im Rheingebiet; Teilprojekt 4: SOBEK Modell Lahn; Pegel Gießen-Klärwerk bis Lahnmündung, Projekt Q3281
- YÖRÜK, A. (2018): 2D-Modellierung zur Überprüfung und Verbesserung von Abflusskurven an der Weser. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 42-51



Kontakt:

Norbert Busch

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5227
E-Mail: busch@bafg.de

Jahrgang: 1954

1974 – 1980

Studium der Meteorologie an der Rheinischen-
Wilhelms-Universität Bonn

1984 – 1986

Weiterbildungsstudium Hydrologie-Wasserwirtschaft
des DVWK und Universität Hannover

seit 1981

Wissenschaftlicher Angestellter der Bundesanstalt für
Gewässerkunde in Koblenz

- seit 1990: Leiter bzw. Ansprechperson des Aufga-
bengebiets „Fließgewässermodellierung“
in den Referaten M1 und M2
- seit 1997: Projektleiter zahlreicher SOBEK-
Modellierungen an Bundeswasserstraßen
- seit 2012: Projektleiter zahlreicher 2D-Modellierungen
an BWaStr
- 1998 – 2013: Projektleiter zur Entwicklung der Software
bzw. des Fachdienstes FLYS der BfG
- seit 2013: Leiter des Fachdienstes FLYS

2D-Modellierung zur Überprüfung und Verbesserung von Abflusskurven an der Weser

Alpaslan Yörük

1 Einleitung und Veranlassung

Im Rahmen des laufenden Auftrags der BfG (im Auftrag des WSA Hann. Münden) „Erstellung eines Delft3D-Flexible Mesh-Modells der Binnenweser von Hann. Münden bis Bremen“ erstellen Hydrotec und Deltares ein 2D-Modell der Binnenweser von Hann. Münden bis zum Wehr Bremen-Hemelingen. Erstmals wird damit ein detailliertes und rekordverdächtiges 2D-Modell über eine Fließlänge von ca. 400 km aufgebaut und betrieben. Das Modell soll künftig zur Beschreibung des gewässerkundlichen Ist-Zustands betrieben werden und somit den gesamten Abflussbereich von Niedrigwasser bis zum extremen Hochwasser abbilden. Die Ergebnisse werden in den von der BfG angebotenen, gewässerkundlichen Online-Fachdienst FLYS für Bundeswasserstraßen (BwaStr) überführt und für deren Teilnehmer zur Verfügung gestellt.

Zusätzlich zur Erstellung und Anwendung des 2D-Modells sollen die Abflusskurven im Ausuferungsspektrum durch die 2D-Modellierung überprüft werden, weil die Analyse und Entwicklung der Gewässerleistungsfähigkeit an ausgewählten Pegeln eine deutliche Änderung aufweist (vgl. Abb. 1).

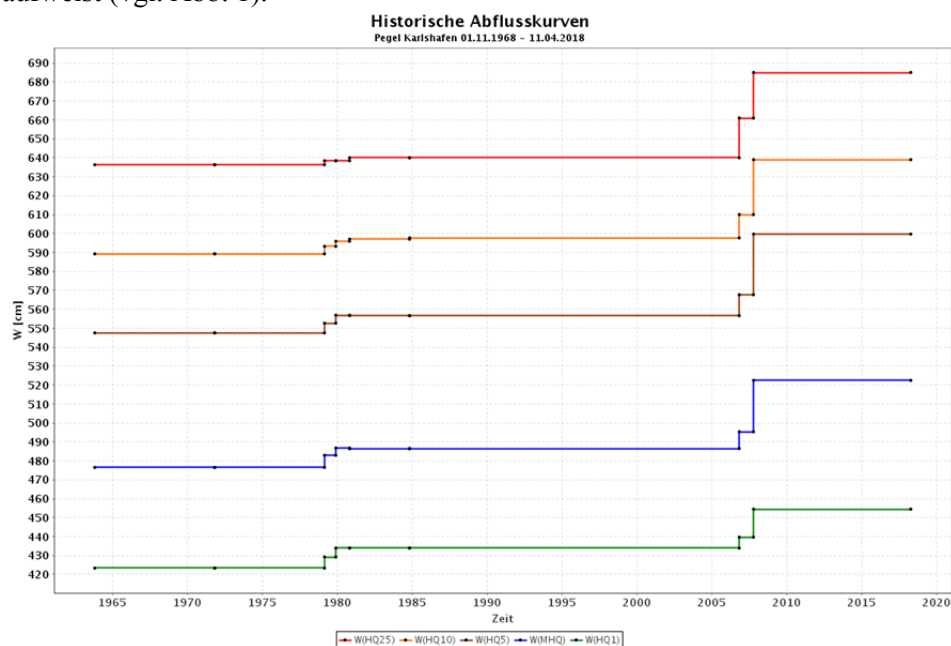


Abb. 1: Entwicklung der Wasserstände am Pegel Karlshafen bei konstantem Abfluss
(Quelle: BfG)

Als Ursache für die Änderung der Gewässerleistungsfähigkeit und somit der Abflusskurven an den Pegeln wird, auf Grundlage der Gegenüberstellung von Profilschnitten aus verschiedenen Dekaden, in erster Linie die Änderung der Gewässertopografie infolge morphodynamischer Prozesse gesehen.

In der Gewässerkunde sind Wasserstandsdaten und die daraus abgeleiteten Abflüsse eine elementare Grundlage bei der Bewirtschaftung von Fließgewässern. Diese Abflüsse sind die maßgebliche Größe beispielsweise für die Bemessung und Errichtung von Bauwerken bzw. Umsetzung von teuren Baumaßnahmen, die Festlegung von Überschwemmungsgebieten oder für die Hochwasservorhersage.

Die Pegelschlüsselkurven bzw. Abflusskurven zeigen das Verhältnis von Wasserstand W zum zugehörigen Abfluss Q für einen Pegelstandort. Während Messgeräte den Wasserstand kontinuierlich aufzeichnen, wird der aufwändiger zu bestimmende Abfluss in größeren zeitlichen Abständen gemessen. Aus der Auswertung von gemessenen Wasserstands- und Abflusswerten lässt sich die Abflusskurve ableiten, die für jeden Pegelwasserstand einen Abflusswert liefert. Die Güte der auf Basis der Pegelschlüsselkurve ermittelten Abflusswerte hängt somit direkt von der abgeleiteten Abflusskurve ab.

In der Regel bilden die Abflusskurven das Verhältnis zwischen W und Q für mittlere bis kleine Hochwasserabflüsse sehr gut ab, für seltene oder sehr seltene Hochwasserereignisse ist dieses Verhältnis jedoch mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Dies liegt zum einen an der Seltenheit dieser Ereignisse und zum anderen daran, dass eine Messung im Hochwasserfall technisch kaum zu bewerkstelligen ist (hohe Gefährdung von Personal, schlechte Erreichbarkeit der Messstelle, keine Vorlandmessung möglich usw.). Dieser Wertebereich ist jedoch für die Bemessung von Bauwerken, die Ermittlung von Überflutungsflächen etc. der relevante Bereich, so dass ein großes Interesse an möglichst gesicherten Werten besteht. Die Wasserwirtschaftsverwaltungen einiger Bundesländer haben darauf reagiert und landesweit die Pegelschlüsselkurven im Extrembereich mithilfe von 2D-Modellierungen überprüft und abgesichert (vgl. z. B. DRÄGERDT & ROTH 2010).

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Methode zur Prüfung von Abflusskurven mithilfe von zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen (2D-)Modellrechnungen.

2 Modellierung

2.1 Grundlagen und Fallbeispiel

Die hydraulische Modellierung der großräumigen Bundeswasserstraßen im Auftrag der BfG erfolgte bisher primär mit eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen (1D-)Modellen. Hierbei wird das Gewässer äquidistant in Abschnitten von 100 m oder 200 m räumlich diskret abgebildet, was eine abschnittsweise Parametrisierung der Topografie darstellt.

Mit dem aktuellen Projekt, die Binnenweser mit einer Gesamtlänge von ca. 400 km inkl. Nebengewässern zweidimensional abzubilden, schlagen BfG und WSA eine neue und zukunftsweisende Richtung ein. Die 2D-Modellierung ermöglicht eine deutlich realitätsnähere, flächenhafte räumliche Diskretisierung der Gewässertopografie kombiniert mit einer verbesserten mathematischen Prozessabbildung.

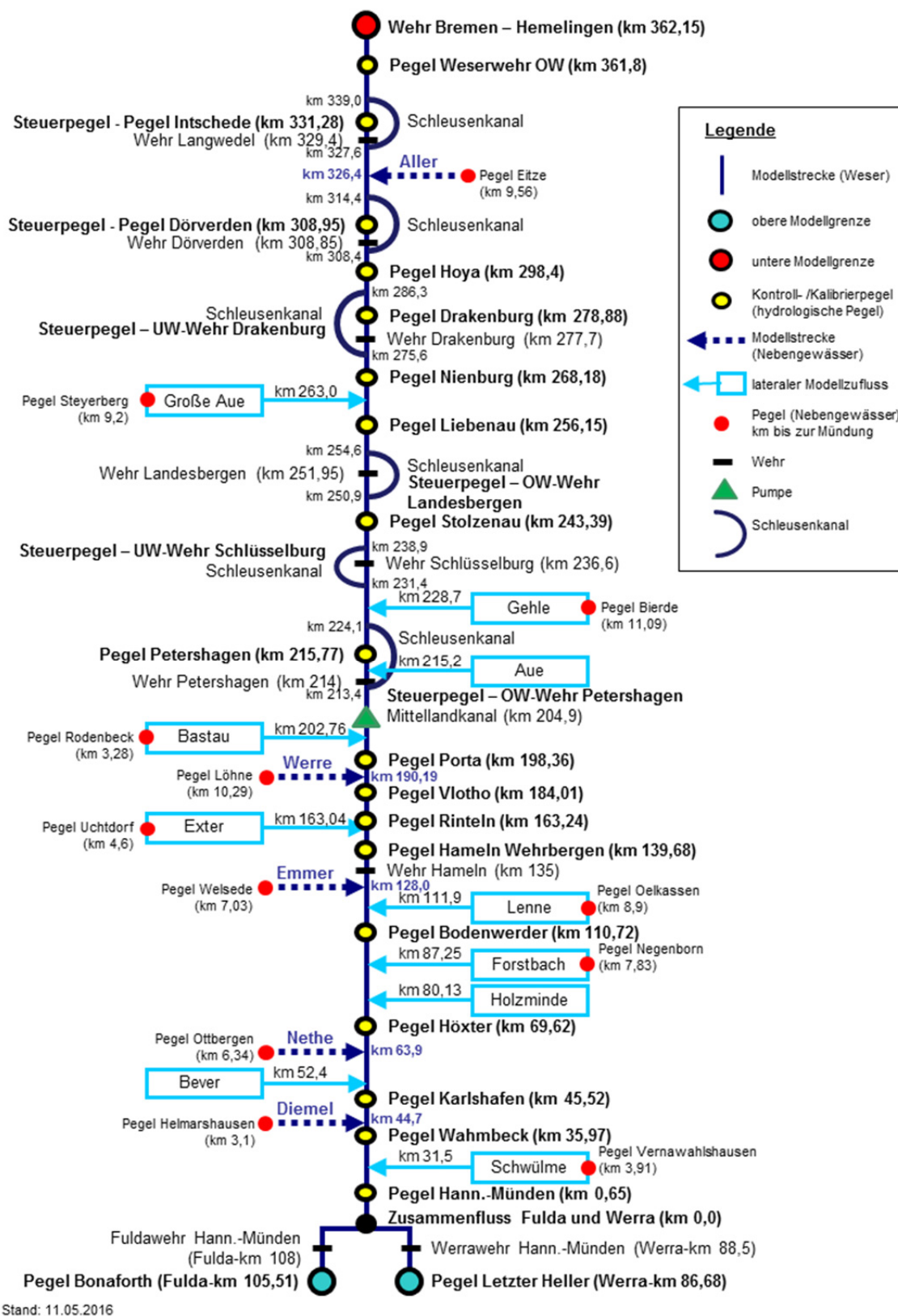


Abb. 2: Schema des zu erstellenden Modellgebiets der Binnenweser (Quelle: BfG)

Dieser Informationsgewinn bzw. die Verminderung an Unsicherheiten ist bei einem Wechsel von einem 1D-Modell zu einem 2D-Modell deutlich größer (YÖRÜK 2008, YÖRÜK & SACHER 2014) als der bei einem Wechsel von einem 2D-Modell zu einem 3D-Modell (WENKA & SCHRÖDER 2004). Vorteil der vereinfachten 1D-Modellierung ist die geringere Rechenzeit, nachteilig sind die Einschränkungen hinsichtlich der nur eindimensional abzubildenden Strömungsprozesse. Das spricht für den Übergang der Modellierung von einem 1D-Modell zu einem 2D-Modell. Weiterhin kann von einer längeren Nutzungsdauer dieser 2D-Modelle ausgegangen werden, da sie inzwischen Stand der Technik sind.

Um die an der Weser bei Hochwasser auftretenden Ausuferungen und Vorlandströmungen im Modell besser abbilden zu können, wird die gesamte Bundeswasserstraße Weser inklusive ihrer maßgeblichen Zuflüsse zweidimensional modelliert. Die Überprüfung der Abflusskurven erfolgt anhand des Gesamtmodells der Weser.

Eine Übersicht des Modellgebietes mit den modellierten Pegeln ist in Abb. 2 dargestellt.

2.2 Modellerstellung

Ein 400 km langes 2D-Modell bedarf einer sorgfältigen, fachlich guten räumlichen Diskretisierung. Hierbei ist die Topografie räumlich gut abzubilden und gleichzeitig sind die numerischen Kriterien bzgl. der Netzelemente zu bewahren. Um beidem gerecht zu werden, hat es sich bewährt, den Flussschlauch mit Rechtecken und das Vorland mit Dreiecken zu diskretisieren.

Die Erstellung des 2D-Modells erfolgt mit Delft3D (Deltares) in mehreren Schritten: Zuerst wird das Modell für den Flussschlauch aufgebaut und anschließend das Modell für das Vorland. Dann werden die Modellteile zusammengeführt und mit entsprechenden Strukturdaten (Rauheiten, 1D-Bauwerke) und Randbedingungen (Zuflüsse etc.) belegt.

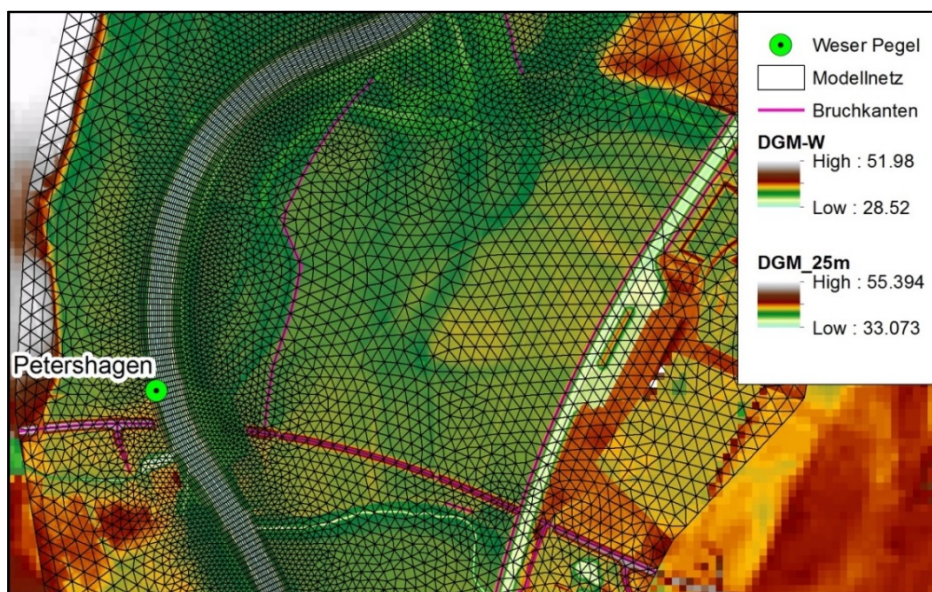


Abb. 3: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz für das 2D-Modell der Binnenweser

Für die Erstellung des Fluss- und Vorlandnetzes wurden von Hydrotec jeweils an die numerischen Kriterien angepasste, GIS-basierte Netzgeneratoren entwickelt. Die Diskretisierung des Vorlandmodells erfolgt hierbei primär auf Grundlage von hydraulisch relevanten Bruchkanten (Deiche, Straßendämme) sowie topografischen Strukturen (Fließwege). Somit wird die

Topografie trotz starker Ausdünnung des DGM sehr gut wiedergegeben. Durch einen numerisch bedingten Übergang vom Flussschlauchnetz zum Vorlandnetz ist die Netzdichte im Vorland in der Nähe des Flussschlauchnetzes deutlich höher (s. Abb. 3). Die einzelnen Buhnen oder Bauwerke werden separat über 1D-Elemente (sog. fixed weirs) abgebildet.

Abschließend wird das gesamte Berechnungsnetz bezüglich numerischer Kriterien und hinsichtlich der Genauigkeit der Topografie überprüft.

2.3 Sensitivitätsstudie und Modellkalibrierung

Nachdem das 2D-Modell aufgestellt und geprüft wurde, erfolgt eine Sensitivitätsstudie. Hierzu werden die im Vorfeld auf Grundlage von Erfahrungswerten zugewiesenen Rauheitsparameter in einem plausiblen Bereich variiert. Dadurch lässt sich der Einfluss der Sohlbeschaffenheit auf den Verlauf der Schlüsselkurve quantifizieren. In der Regel ist der Einfluss der Rauheiten für niedrige Abflüsse eher gering, während er mit zunehmendem Abfluss ggf. deutlich zunimmt. Somit dient die Sensitivitätsstudie zum einen zur Prüfung der Modellgeometrie (Vergleich Modellergebnisse mit Messwerten im kleinen Abflussbereich) und zum anderen für eine erste Abschätzung für die weitere Feinkalibrierung (Vergleich der Modellergebnisse mit Messwerten im mittleren und insbesondere hohen Abflussbereich). Die Erfahrung zeigt insgesamt, dass mit einer guten Abbildung der Topografie und sinnvollen Annahme von Rauheitswerten die Messwerte vom Modell im ersten Rechenlauf sehr gut nachgerechnet werden können.

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsstudie am Pegel Porta. Darin zeigen die Simulationsergebnisse (farbige Liniendarstellung) die Modellergebnisse für eine ansteigende und abfallende synthetische Ganglinie, um zum einen für das gesamte Abflussspektrum die Modellergebnisse den gemessenen W-/Q-Werten sowie die Hysterese darzustellen.

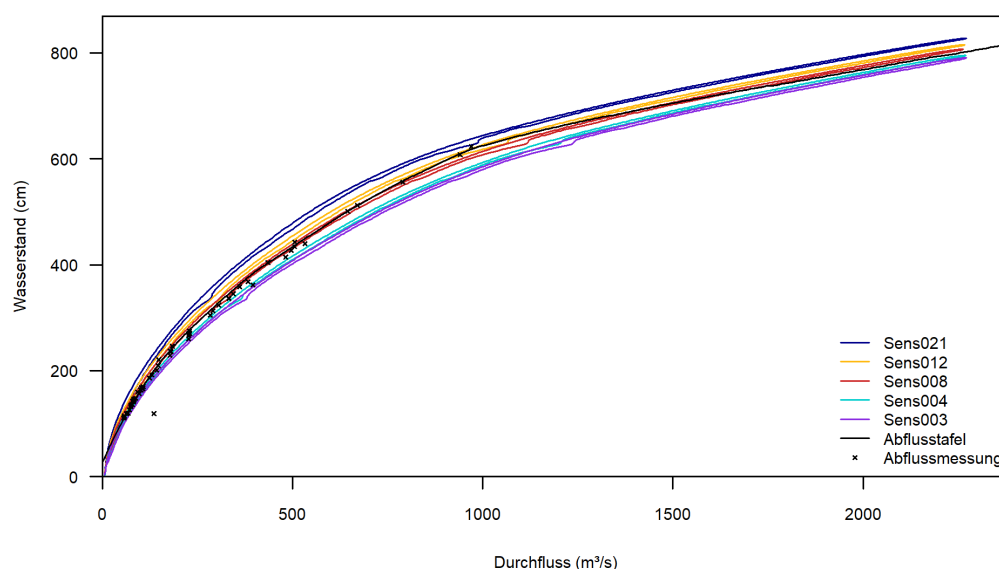


Abb. 4: Ergebnis Sensitivitätsstudie (umgerechnete Strickler-Werte von ca. 32 – 48 m³/s) am Pegel Porta (farbig: simulierte Abflusskurven infolge synthetischer Hochwasserganglinie, schwarz: aktuelle Abflusskurve)

Liegen sämtliche Informationen (W-/Q-Messungen, gültige Abflusskurve sowie simulierte Abflusskurven) in einer Übersicht vor, ist vorab die Güte der Messwerte zu bewerten. Folgende Aspekte sind zu überprüfen:

- > Stimmt der Standort des Pegels mit dem Standort der Abflussmessung überein?
- > Sind Umbauten am Pegel erfolgt?
- > Stimmt der Pegelnullpunkt (PNP)?
- > Ist der Pegel umläufig bzw. wurde der Abfluss über den gesamten Fließquerschnitt gemessen?
- > Wie aktuell und repräsentativ sind die Messwerte?
- > Wie genau ist die Messung (Messmethode)?
- > Wie groß ist der jahreszeitliche Einfluss von Vegetation/Bewuchs?
- > Gibt es eine starke Streuung der Messwerte und worin liegt diese begründet?
- > Gibt es Rückstauinflüsse durch unterhalb einmündende Nebengewässer?
- > Gibt es Rückstauinflüsse durch unterhalb liegende Bauwerke?

Die Analyse der W-/Q-Messwerte muss die für die Kalibrierung maßgeblichen Messwerte herausarbeiten, an denen schließlich das Modell kalibriert wird.

Parallel zu der Sensitivitätsstudie sowie Modellkalibrierung an den vorhandenen Pegeln erfolgen analoge Arbeiten auf Grundlage vorhandener Fixierungsereignisse. So wurde das 2D-Modell für jeweils ein Niedrigwasser, Mittelwasser sowie Hochwasser kalibriert und validiert. Die Kalibrierung erfolgte jeweils stationär (Differenzlängsschnitte simulierter und fixierter Werte mit dem Ziel einer mittleren Abweichung von kleiner 5 cm) und instationär (Vergleich gemessener und simulierter Ganglinien mit dem Ziel einer mittleren Abweichung der Wasserspiegeldifferenzen von kleiner 5 cm bzw. der Abflüsse von kleiner 10 % und der Scheiteleintrittszeitpunkte von kleiner 3 h). Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Gegenüberstellung von simulierter und gemessener Wasserstandsganglinien am Pegel Porta.

2.4 Berechnete Abflusskurve

Das von Niedrig- bis Hochwasser stationär und instationär kalibrierte sowie validierte Modell wird zur Beschreibung des gewässerkundlichen Ist-Zustandes mit 30 hydrologischen Längsschnitten (von Niedrig- bis Extremhochwasser) stationär angewendet. Diese Ergebnisse werden zur Prüfung und Bewertung der Abflusskurven herangezogen.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft das Prüfungsergebnis der Abflusskurve am Pegel Petershagen. Darin sind die Fixierungsdaten (dekadenweise klassifiziert), die aktuell gültige Abflusskurve und die simulierte Abflusskurve dargestellt. Hinsichtlich der simulierten Abflusskurve sind zwei Kurven dargestellt, um den Einfluss der Pegelumläufigkeit darzustellen bzw. zu quantifizieren. Diesbezüglich wurde der simulierten Wassertiefe am Pegel einerseits die Abflussmenge im Flussnetz (Q_{FS}) und andererseits die Abflussmenge im gesamten Tal (Q_{ges}) gegenübergestellt.

Das Ergebnis zeigt einerseits die Güte der Modellkalibrierung (Vergleich der simulierten Abflusskurve mit den Messwerten) und andererseits das Überprüfungsergebnis der aktuell gültigen Abflusskurve (Vergleich der simulierten mit der aktuell gültigen Abflusskurve).

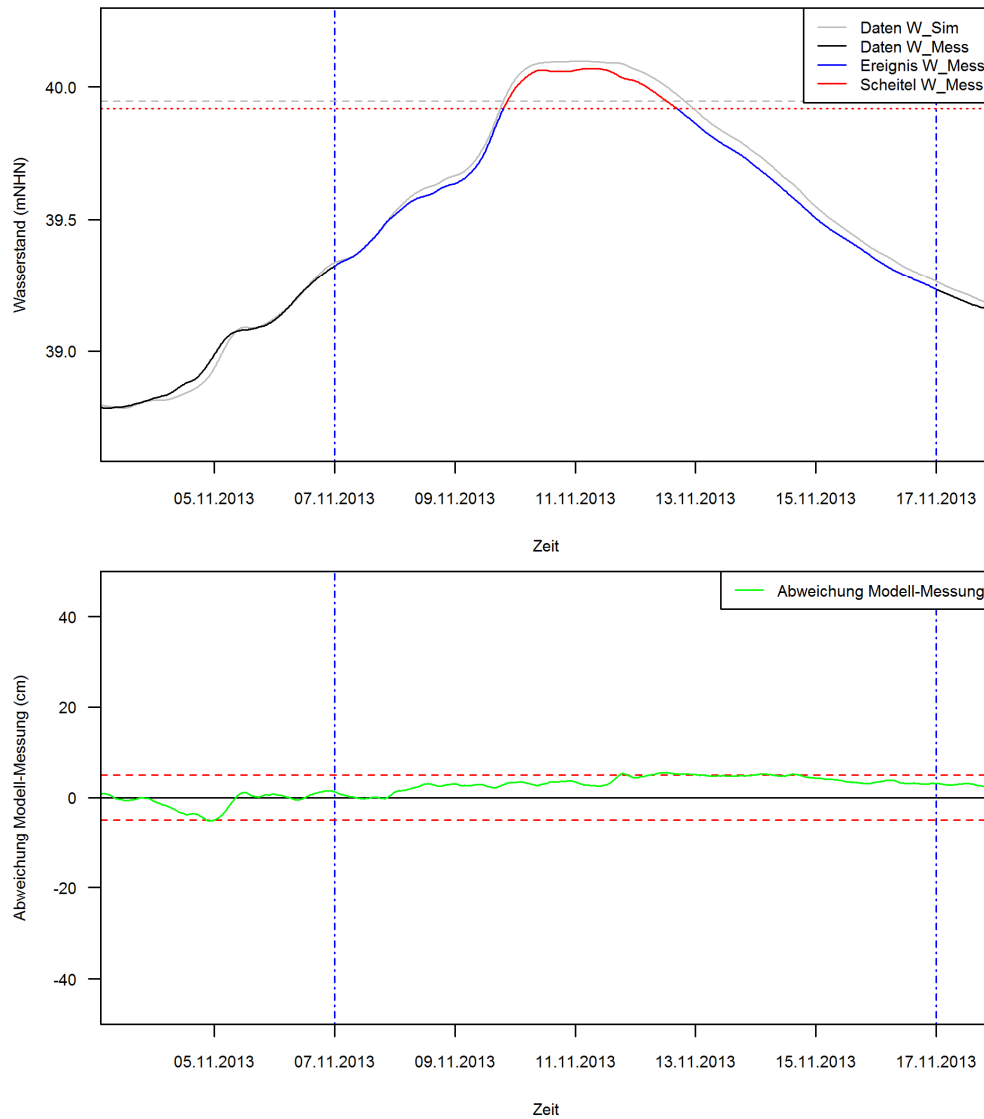


Abb. 5: Zwischenergebnis Wasserspiegeldifferenzen instationäre Kalibrierung MW Oktober 2013 am Pegel Porta

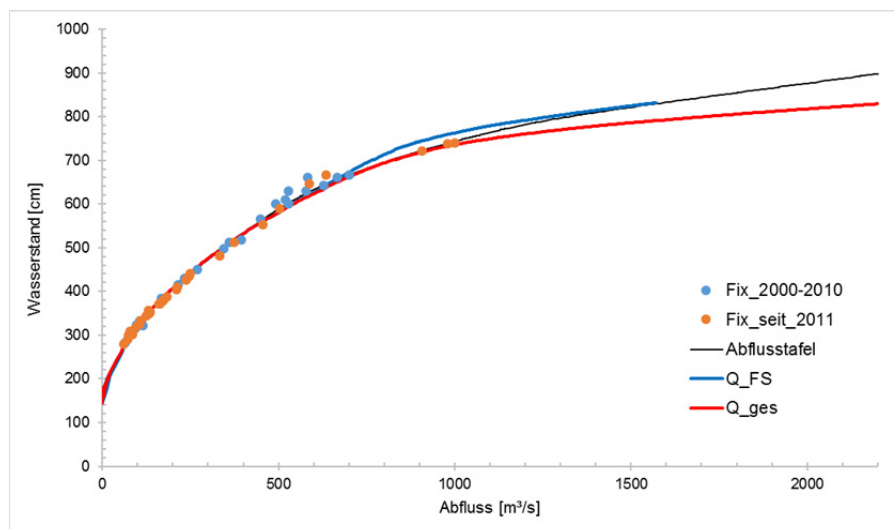


Abb. 6: Darstellung Zwischenergebnis zur Prüfung der Abflusskurve am Pegel Petershagen

Am Pegel Petershagen liefern somit die Modellergebnisse folgende Erkenntnisse:

- > Gute Übereinstimmung der aktuellen Fixierungswerte mit der gültigen sowie der simulierten Abflusskurve.
- > Im Extrapolationsbereich der gültigen Abflusskurve zeigen die berechnete und die gültige Abflusskurve zunehmend einen divergierenden Verlauf.
- > Ab einem Wasserstand von ca. 6,6 m ü. PNP kommt es zu einer Ausuferung am Pegelquerschnitt. Zudem werden die Abflussanteile Flussschlauch und Gesamtabfluss wasserstandsabhängig angegeben.

Neben Pegeln, an denen die gültige Abflusskurve über das gesamte Abflussspektrum im Wesentlichen mit den 2D-Modellergebnissen bestätigt werden konnte, führten die 2D-Modellergebnisse an anderen Pegeln (vgl. Zwischenergebnisse am Pegel Petershagen) zu einer Verbesserung der Abflusskurven (v. a. im Extrapolationsbereich). Die Modellergebnisse liefern zudem weitere Erkenntnisse wie:

- > ggf. Einflüsse von Bauwerken
- > den Ausuferungsbeginn
- > über den gesamten Fließquerschnitt aufgeteilte Abflussanteile
- > ggf. Quantifizierung des Hysterese-Effekts
- > ...

3 Zusammenfassung und Ausblick

Hydrotec hat erstmalig ein rekordverdächtiges 2D-Modell mit einer Länge von ca. 400 km und einer Ausdehnung, die ein HQ_{Extrem} abdeckt, erstellt, stationär und instationär genau kalibriert und der BfG für die gewässerkundliche Ist-Beschreibung der Binnenweser zur Verfügung gestellt. Somit ist der Generationenwechsel bei der BfG von 1D-Modellen zu 2D-Modellen der BWaStr eingeläutet. Zusätzlich wird das 2D-Modell zur Überprüfung der Abflusskurven im Ausuferungsbereich verwendet.

Hydrotec hat im vergangenen Jahrzehnt neben den Weserpegeln mehr als dreihundert Abflusskurven auf Grundlage von numerischen Modellrechnungen (1D und 2D) untersucht. Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass es sinnvoll und notwendig ist, die Abflusskurven im Extrembereich durch Modellrechnungen zu prüfen. Aufgrund der Fortschritte in der Modelltechnik sollten bevorzugt 2D-Modelle Verwendung finden.

Während ein Teil der extrapolierten Abflusskurven mit geringen Abweichungen bestätigt werden konnte, unterschieden sich bei mehr als 50 % der Pegel die berechneten und die extrapolierten Abflusskurven signifikant voneinander. Dabei zeigten sich Fälle, in denen die hydraulisch simulierte Abflusskurve steiler, aber auch flacher als die extrapolierte Abflusskurve verläuft. Dies führt bei der Übertragung von hohen Wasserständen zum Abfluss dazu, dass Abflüsse sowohl über- als auch unterschätzt wurden.

Neben einer Verbesserung und/oder Absicherung der aktuell gültigen Abflusskurven auf Grundlage der 2D-Modellergebnisse konnten oft weitere Erkenntnisse gewonnen werden. So lieferten die 2D-Modellrechnungen Informationen hinsichtlich einer potenziellen Pegelumströmung sowie von Einflüssen durch seitliche Zuflüsse oder nahegelegene Bauwerke.

Das 2D-Modell bietet weiterhin die Möglichkeit, zusätzliche Fragestellungen bezüglich des Ausuferungsbeginns, der Abflussaufteilung bei Pegelumläufigkeiten, Abflussaufteilung Gewässer und jeweils der Vorländer, Fließgeschwindigkeiten etc. zu beantworten.

Neben seitlichen Zuflüssen zeigen insbesondere starke Interaktionen unterhalb des Pegels zwischen Vorland- und Flussschlauchabfluss (z. B. Rückströmung Vorlandströmung in den Flussschlauch) oder auch Bauwerke unterhalb des Pegels zum Teil signifikante Einflüsse auf die Abflusskurven. In beiden Fällen wird ab einem definierten Abfluss ein Rückstau erzeugt. In manchen Fällen führt der Rückstau zu einer Verminderung des Abflusses durch den Pegelquerschnitt bei gleichzeitiger Zunahme des Wasserspiegels. Grund ist der mit zunehmendem Gesamtabfluss beginnende Rückstauprozess, der eine Reduktion der Fließgeschwindigkeiten bewirkt.

Insgesamt führt die modelltechnische Überprüfung der Abflusskurven im Extrembereich immer zu einer Absicherung bzw. Verbesserung der vorliegenden Abflusskurven und liefert zusätzliche Erkenntnisse zu den Fließprozessen am Pegel. Teilweise konnten Empfehlungen zur Verlegung des Pegelstandortes an einen besser geeigneten Ort gegeben werden. Wasserwirtschaftlich relevante Pegel sollten deshalb grundsätzlich anhand von 2D-Modellrechnungen überprüft werden.

Literatur

- DRÄGERDT, S., C. ROTH (2010): Hydraulische Überprüfung von Abflusskurven an Pegeln im Extrembereich. Graw, K.-U. (Hrsg.): Wasserbau und Umwelt – Anforderungen, Methoden, Lösungen. Dresdner Wasserbaukolloquium 2010. Dresden, (Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 40), S. 495-504
- WENKA, T., P. M. SCHRÖDER (2004): Unsicherheiten bei der Abbildung von 3D-Effekten in der Hochwasserabschätzung mit 2D-tiefengemittelten Berechnungsverfahren. In: Wasserbauliche Mitteilungen TU Dresden, Heft 27
- YÖRÜK, A. (2008): Unsicherheiten bei der hydrodynamischen Modellierung von Überschwemmungsgebieten (Dissertation), Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 99, München
- YÖRÜK, A., H. SACHER (2014): Methoden und Qualität von Modellrechnungen für HW-Gefahrenflächen. In: Stamm, J. ; Graw, K.-U. (Hrsg.): Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft. 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014. Dresden, (Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50), S. 55-64



Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Alpaslan Yörük

Hydrotec Ingenieurgesellschaft
für Wasser und Umwelt mbH
Bachstraße 62-64
52066 Aachen
Tel.: 0241/ 94689-0
E-Mail: yoeruek@hydrotec.de

1996 – 2003

Studium Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen

2003 – 2008

Lehrstuhlassistant, Lehrstuhl für Wasserwirtschaft/
Ressourcenschutz, Institut für Wasserwesen der
Universität der Bundeswehr München

2008 – 2015

Mitarbeiter bei Hydrotec Ingenieurgesellschaft für
Wasser und Umwelt mbH

seit 2015

Gesellschafter bei Hydrotec Ingenieurgesellschaft
für Wasser und Umwelt mbH

seit 2015

Professur für Wasserbau und Wasserwirtschaft an
der Hochschule für Technik und Wirtschaft des
Saarlandes

Projektbearbeitung (Auswahl)

2010 – 2011 1D-HN-Modellierung Donau (ca.
500 km) SOBEK River

2013 – 2014 Aktualisierung des SOBEK-Modells
für die Bundeswasserstraße Main

seit 2016 Erstellung eines Delft3D-Flexible
Mesh-Modells der Binnenweser von
Hann. Münden bis Bremen

seit 2017: Erweiterung SOBEK-Modell Donau

Analyse und Optimierung des Elbe-Havel-Systems mithilfe von 2D-Modellierung

Markus Promny, Norbert Busch, Andrea Gleim,
Matthias Hammer und Rita Ley

1 Einleitung

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) führt derzeit mehrere modellbasierte Projekte im Bereich der Havel und der unteren Mittelelbe durch. Veranlassung hierzu war das extreme Hochwasserereignis der Elbe im Juni 2013. In der Folge wurden Vereinbarungen zwischen dem Bund und den Ländern geschlossen, den Gefahren aus Hochwasserereignissen gemeinsam entgegenzuwirken. Weiterhin beschloss die Umweltministerkonferenz in einer Sondersitzung am 2. Sept. 2013 die Erarbeitung eines Nationalen Hochwasserschutzprogramms (NHWSP) unter der Koordinierung des Bundes.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) führt die BfG derzeit in Zusammenarbeit mit den Bundesländern ein flussgebietsübergreifendes Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur Analyse möglicher Maßnahmenwirkungen auf Hochwasser in den Einzugsgebieten von Donau, Rhein und Elbe durch. Darüber hinaus ist die BfG Partner der betroffenen Bundesländer in drei Einzelprojekten in den Einzugsgebieten der Bundeswasserstraßen Elbe und der Havel. Die Untersuchungsprogramme und -methoden dieser Kooperationsprojekte werden im vorliegenden Artikel erläutert.

2 Projektziele

Im Projekt „2D-Modellierung Tangermünde-Geesthacht zur Verbesserung der Hochwassersituation an der unteren Mittelelbe“ wird seit 2017 ein Modell von ca. 200 km Fließstrecke aufgebaut, um die Wirkung von Maßnahmen auf Hochwasser entlang der Elbe zu evaluieren und zu optimieren. Beim derzeit gültigen Bemessungshochwasserabfluss von 4.545 m³/s am Pegel Wittenberge bestehen teilweise Defizite im Freibord der Deiche entlang der unteren Mittelelbe (NLWKN 2017). In einem bereits abgeschlossenen Projekt der BfG mit den anliegenden Bundesländern Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern wurden Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes untersucht und u. a. 25 hydraulische Engstellen entlang der Fließstrecke zwischen Wittenberge und Geesthacht mittels 2D-Modellierung identifiziert (PROMNY et al. 2015). Im derzeitigen Projekt an der unteren Mittelelbe werden weitere abflussverbessernde Maßnahmen, speziell auch an den hydraulischen Engstellen untersucht. Hierzu zählen vegetationsbezogene Maßnahmen (Bewuchsreduzierung und Rückschnitt), topografiebeeinflussende Maßnahmen (Anschluss von Altarmen, Vorlandabgrabungen und Flutrinnen) sowie Deichrückverlegungen und Umflutgrinne.

Darüber hinaus werden ebenfalls die im NHWSP gemeldeten, gesteuerten Rückhaltmaßnahmen Lenzer Wische und Karthaneniederung untersucht und Optimierungsmöglichkeiten für die Nutzung der bestehenden Havelpolder für den Hochwasserschutz der unteren Mittelbe eruiert.

Die Havel ist der Hauptzufluss an der unteren Mittelbe. Die im Unterlauf befindlichen Havelpolder dienen der Verbesserung der Hochwassersituation an der unteren Mittelbe durch Scheitelkappung im Fall von extremem Elbehochwasser. Hierzu werden die Deiche der Havelpolder im Ereignisfall mit Breschen versehen. Bisher kamen die Havelpolder bei den Hochwasserereignissen 2002 und 2013 zum Einsatz. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Einströmung in den Havelpolder Twerl am 10. Juni 2013.



Abb. 1: Einströmung in den Havelpolder Twerl am 10.06.2013 (Foto: LfU Brandenburg, W24)

Das Prozedere bei einer Kappung ist im Staatsvertrag vom 6. März 2008 geregelt, dessen Umsetzung der Koordinierungsstelle Quitzöbel obliegt. Zur möglichen Optimierung der Steuerung der Havelpolder wird seit 2016 das NHWSP-Projekt „Optimierung der Nutzung der Havelpolder“ durchgeführt. Hierbei kommen in einer hybriden Modellierung ein 2D-Modell der Havel zwischen Rathenow und der Havelmündung sowie gegenständliche Detailmodelle der Polderdeichbreschen zum Einsatz. Neben grundlegenden Untersuchungen, wie z. B. der Aktualisierung der instationären Wellenscheitelbeziehungen zwischen Neuwerben und Wittenberge und der Überprüfung der Wehrbedienungs Vorschriften sind auch konkrete Verbesserungsvorschläge, z. B. im Hinblick auf eine Optimierung der Einlaufquerschnitte der Havelpolder in ihrer Anzahl, Lage und technischen Ausbildung zu erbringen. In einer Reihe von instationären Szenarienberechnungen wird anhand zurückliegender Hochwasserereignisse die vorgeschlagene Optimierung evaluiert.

Ein weiteres Projekt „Optimierung des Stauregimes Havel und Spree“ fokussiert seit 2017 in Zusammenarbeit mit den Bundesländern Brandenburg und Berlin auf den Rückhalt des Haveleigenwassers im Falle der Nutzung der Havelpolder. Für einen Zeitraum von bis zu 72 Stunden während des Havelpoldereinsatzes muss das Eigenwasser von Havel und Spree temporär im Gewässersystem zurückgehalten werden. Hierzu wird ein 2D-Modell zwischen Berlin-Spandau (Havel), Berlin-Mühlendamm (Spree) und Kleinmachnow (Teltowkanal) als obere Modellränder sowie Rathenow als unterer Modellrand aufgebaut. Auch in diesem Projekt werden instationäre Szenarienberechnungen, basierend auf zurückliegenden Hochwasserereignissen und synthetisch generierten Modellereignissen, durchgeführt. Weitere Analysen beinhalten u. a. die Untersuchung des Windeinflusses auf die Wasserspiegellagen sowie mögliche Deichbrüche im Fall von Extremszenarien.

Die Teilmodelle der drei Projekte sollen im weiteren Verlauf der Arbeiten miteinander gekoppelt werden und die ganzheitliche Modellierung des Elbe-Havel-Systems zur Verbesserung des Hochwasserabflussgeschehens ermöglichen.

3 Modelltechnik

Die Simulation tiefengemittelter Strömungen, wie sie zur Beantwortung der Projektfragestellungen notwendig ist, kann heute mit hydronumerischen Standardsoftwarelösungen durchgeführt werden. Der Umfang der hier eingesetzten Modelle ist zwar noch außergewöhnlich, lässt sich durch effiziente Parallelisierungsverfahren und eine geeignete Rechnerhardwarelösung jedoch handhaben. Lediglich bei einigen Detailfragestellungen kommt die numerische Simulation noch an ihre Grenzen. Nicht aus technischen Gründen, sondern vielmehr weil die physischen Randbedingungen noch nicht sicher bestimmt sind. Daher wird in den hier vorgestellten Projekten die Methodik der hybriden Modellierung eingesetzt. Ergänzend zur numerischen Modellierung des Gesamtgebietes erfolgt eine gegenständliche Modellierung im bisher noch mit erheblichen Unsicherheiten behafteten Bereich: dem Nahfeld der Strömung in den Polderdeichbreschen. Die gewonnenen physikalischen Randbedingungen im Breschenbereich werden anschließend zur Verbesserung der numerischen Modellierung verwendet.

3.1 Numerische Modellierung

Die numerischen Modelle werden einheitlich als 2D-tiefengemittelte Modelle im System Delft3D-Flexible Mesh (Deltares 2016) aufgebaut. Hierbei kommen gekrümmte Rechteckgitter mit Knotenabständen zwischen ca. 15 und 40 m in den Hauptabflussbereichen sowie überwiegend Dreieckselemente mit Maschenweiten zwischen ca. 15 und 300 m im Vorland zum Einsatz. Für die Generierung des Vorlandnetzes wurde eigens ein an die Projekttrandbedingungen angepasster Gittergenerator entwickelt, um die optimale Vermaschung im Bereich der abflussrelevanten Geländesprünge (Böschungen, Deiche, Dämme etc.) zu gewährleisten (Hydrotec 2017).

Eine besondere Herausforderung in den Projekten stellt die komplexe Datenhaltung dar: Unterschiedliche Datenquellen aus den Bundesländern, der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sowie des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie werden in einer ArcGIS-Umgebung zusammengeführt und aufbereitet. Mit einer speziellen Toolbox werden daraus die Eingangsdateien für die numerische Modellierung generiert. Abbildung 2 zeigt die Ausdehnung der Modellgebiete in den drei hier behandelten Projekten.

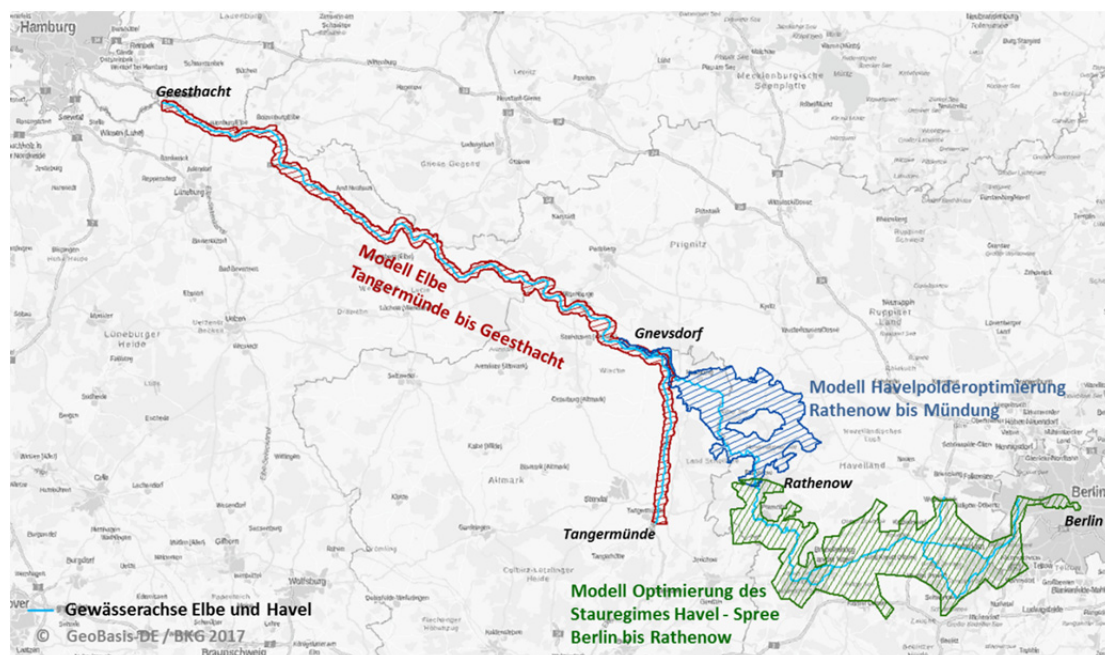


Abb. 2: Projektgebiete untere MittelElbe (rot), Havelpolderoptimierung (blau) sowie Optimierung des Stauregimes Havel und Spree (grün)

Die topografischen Informationen werden in Digitalen Geländemodellen des Wasserlaufes inklusive dessen Vorland (DGM-W) vorgehalten. Für die Elbe und die Havel im Projektgebiet der Havelpolderoptimierung existieren DGM-W mit einer Datenaktualität von ca. 2006. In den gewässerferneren Bereichen, bspw. in den Poldern, werden die Daten der ländereigenen Geländemodelle ergänzend verwendet. Im Projektgebiet Optimierung des Stauregimes Havel und Spree wird eigens ein projektbezogenes DGM-W erstellt.

Da die Elbe ein vergleichsweise dynamisches Gewässer ist, deren aktuelle Sohlhöhen gegenüber dem Stand des DGM-W 2006 teilweise erheblich abweichen, wurde eine Aktualisierung der topografischen Daten für das Projekt an der unteren MittelElbe für notwendig erachtet. Im Bereich der Gewässersohle wurden die bisherigen Daten durch die aktuellste Flächenpeilung der WSV aus 2017 ersetzt. Die Höhen der Buhnen, welche zwischenzeitlich vielfach von Unterhaltungsmaßnahmen betroffen waren, wurden ebenfalls anhand der neuesten verfügbaren Einmessungen aktualisiert. In den Vorländern finden die aktuellen DGM der Bundesländer Verwendung. Lediglich der Bereich der Wasserwechselzone (Buhnenfeldbereich) wird noch mit überwiegend interpolierten Geländehöhen aus dem DGM-W von 2006 belegt. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die verwendeten Geländedaten der Elbe im Bereich Dömitz. Rot schraffiert ist der Bereich der DGM-W Daten aus 2006. Die Aktualisierung der Geländehöhen zeigt bereichsweise gravierende Geländehöhenunterschiede zum veralteten DGM-W 2006 und unterstreicht den dringenden Bedarf für ein aktualisiertes DGM-W der gesamten Elbe (BUSCH 2018).



Abb. 3: Beispiel für Geländedaten der Elbe im Bereich Dömitz. Die Vorlanddaten stammen aus dem Landes-DGM aus MV, die Sohlhöhen aus der Flächenpeilung der WSV von 2017. Rot schraffiert ist der Bereich mit Daten aus dem DGM-W 2006.

3.2 Gegenständliche Modellierung

Ergänzend zur numerischen Modellierung kommen im Projekt Havelpolderoptimierung auch großmaßstäbliche gegenständliche Ausschnittsmodelle zum Einsatz. Diese dienen der Verringerung der Modellierungsunsicherheiten im Bereich der Poldereinlaufbereiche. Die Havelpolder wurden in den Hochwasserereignissen von 2002 und 2013 planmäßig durch eigens dazu angelegte Deichbreschen geflutet. Hier bestehen Wissensdefizite in Bezug auf die sich während der Polderbefüllung einstellende Sohltopografie in den Deichbreschen sowie die Rauheitswirkungen im Nahbereich. Weiterhin sollen im Hinblick auf eine mögliche Verbesserung der Polderbefüllung Erkenntnisse zur optimalen Geometrie von Deichbreschen nach technischen, hydraulischen sowie organisatorischen Gesichtspunkten gewonnen werden. Ebenfalls Bestandteil des Untersuchungsprogramms ist die Wirkungsanalyse ergänzender morphologischer Maßnahmen zur Unterstützung der Polderfüllungsvorgänge, wie z. B. Flutmulden.

Die hierbei durchzuführenden Versuchsreihen werden vom Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen konzipiert und im dortigen wasserbaulichen Labor ausgeführt. Es kommen Versuche sowohl mit fester Sohle, die mittels 3D-Druck der tatsächlich gemessenen Sohltopografie nach einer Deichbreschendurchströmung im Jahr 2013 nachgebildet wird, als auch mit beweglicher Sohle zum Einsatz. Die in gegenständlicher Modellierung ermittelten Geometrie- und Rauheitsparameter im Deichbreschenbereich werden anschließend zur Verbesserung der numerischen Modellierungen eingesetzt (hybride Modellierung).

4 Stand der Untersuchungen

Für den Bereich der unteren Havelstrecke zwischen Rathenow und der Havelmündung liegt inzwischen ein vollständig kalibriertes Modell aus dem Projekt Optimierung der Havelpolder vor. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Strömungssituation bei der Nachrechnung des Hochwasserereignisses von 2013 im Bereich des Wehres und der Schleuse Garz (links im Bild) sowie die Einströmung in den Polder Twerl am 10. Juni 2013 um 10 Uhr. Die Situation der Einströmung, auf die der weiße Pfeil deutet, entspricht dem Foto in Abbildung 1. Mithilfe des numerischen Modells kann nun systematisch für diesen und die weiteren Polder nach Verbesserungspotenzial für die Polderbefüllung und die Hochwassersituation insgesamt gesucht werden.

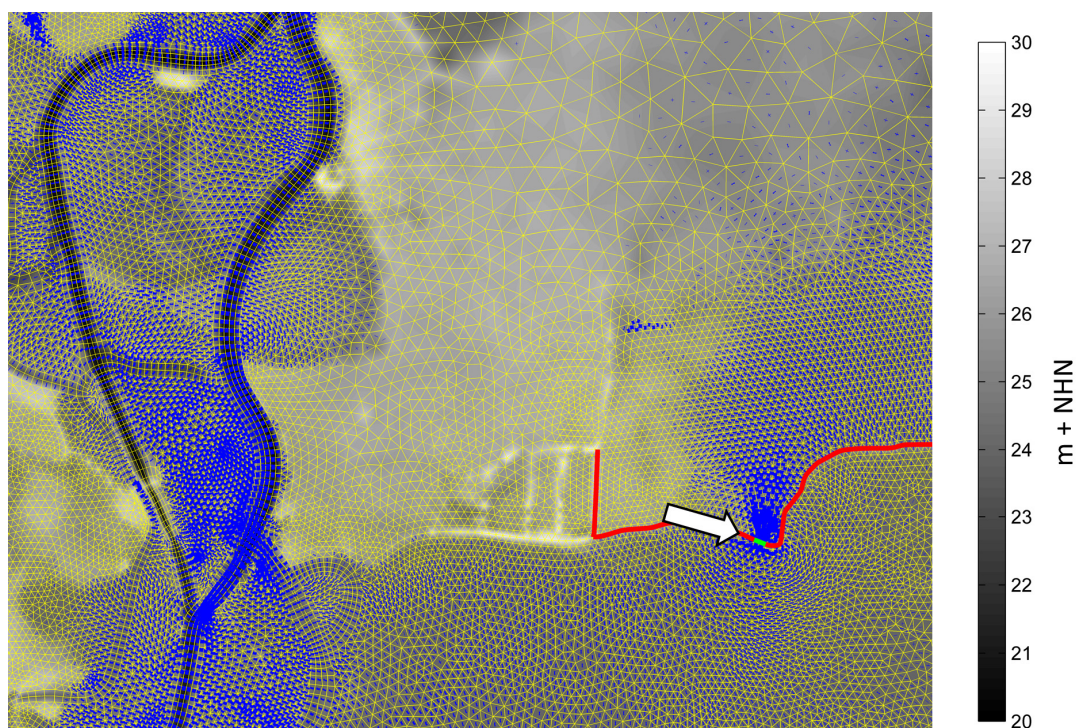


Abb. 4: Strömungssituation (blaue Pfeile) in der Modellierung des Hochwasserereignisses am 10. Juni 2013. Standort und Blickrichtung des Fotos in Abbildung 1 sind durch den weißen Pfeil gekennzeichnet. Der Deich des Polders Twerl ist in rot, die Bresche in grün dargestellt.

Für die Untersuchung der unteren Mittelelbe liegt aus einer vorhergehenden Untersuchung bereits ein Modell für die Strecke Wittenberg bis Geesthacht vor (PROMNY et al. 2015). Zur Zeit erfolgt die Umstellung auf das Modellsystem Delft3D-Flexible Mesh sowie die Erweiterung nach oberstrom bis Tangermünde. Im Zuge des Wechsels der Modellierungsumgebung werden auch die Datengrundlagen aktualisiert und zwischenzeitlich seit Erstellung des Vorgängermodells umgesetzte Maßnahmen mit Wirkung auf den Hochwasserabfluss ergänzt, wie zum Beispiel die 2016 abgeschlossene Deichrückverlegungsmaßnahme Sandau Nord.

Für die Untersuchung des Gewässersystems Havel/Spree oberhalb von Rathenow wird zunächst ein Pilotmodell im Bereich zwischen Ketzin und Brandenburg an der Havel erstellt. Außerdem wird derzeit ein DGM-W für das Projektgebiet oberhalb von Rathenow anhand einer aktuellen, dafür vervollständigten Datengrundlage aufgebaut.

Nach Fertigstellung der Teilmodelle erfolgt die Zusammenführung zu einem gekoppelten 2D-Gesamtmodellsystem mit insgesamt ca. 450 km Hauptgewässerstrecken von Havel und Elbe und einem gesamten Modellgebiet von ca. 1.800 km². Für den geplanten Einsatz mit stationären und instationäre Szenarienberechnungen steht an der BfG ein High-Performance-Rechencluster mit 265 CPUs zu Verfügung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den hier vorgestellten Untersuchungen sollen die Abflussverhältnisse an der unteren Mittel-elbe und des Gewässersystems Havel/Spree unterhalb von Berlin analysiert und im Hinblick auf einen verbesserten Hochwasserschutz optimiert werden. Dabei werden an der unteren Mittel-elbe Deichrückverlegungen, Maßnahmen im Vorland und der Einsatz von Poldern untersucht. Weiterhin werden der bisherige Einsatz der Havelpolder sowie das Gewässersystem oberhalb der Havelpolder bis Berlin systematisch analysiert und Vorschläge zur Optimierung unterbreitet.

Es ist zu erwarten, dass infolge der durchgeführten Analysen Optimierungspotenzial identifiziert und damit eine Verbesserung des Hochwasserschutzniveaus der betroffenen Gewässer ermöglicht wird. Im Ad-hoc-Bericht der BfG zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm (PROMNY et al. 2014), in dem die zu erwartenden Wirkungen der hier vorgestellten Maßnahmen an der Havel beziffert werden mussten, wurde das Optimierungspotenzial überschlägig mit 25 % des aktuellen Rückhaltevolumens angenommen. Ob dieser Wert, der im Fall der Havelpolder 70,75 Mio. m³ und für das Stauregime des Gewässersystems Havel/Spree 9,25 Mio. m³ entspricht, erreicht wird, kann erst mit Fortschreiten der bisherigen Untersuchungen beurteilt werden. Die Projekte werden nach bisherigem Stand im März 2019 (Optimierung der Havelpolder), im Juni 2020 (Optimierung Stauregime Havel und Spree) bzw. Dezember 2021 (untere Mittel-elbe) abgeschlossen sein.

Literatur

- BUSCH (2018): Fließgewässersmodellierung für Bundeswasserstraßen im Dienst der Gewässerkunde. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 27-41
- Deltares (2016): Delft3D-Flow User Manual, Version 3.15, 16. Dezember 2016. URL: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>
- Hydrotec (2017): Erstellung eines Vorlandnetzgenerators für Delft3D FM, Projektdokumentation (unveröff.)
- NLWKN (2017): Abflussverbessernde Maßnahmen an der Unteren Mittel-elbe. Rahmenplan, Teil Niedersachsen. Hrsg.: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden. URL: https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/116201/Rahmenplan_Elbe.pdf

PROMNY, M., M. HAMMER, M. HATZ, M., N. BUSCH (2015): 2D-Modellierung an der unteren Mittel-Elbe zwischen Wittenberge und Geesthacht – Beschreibung der Strömungsverhältnisse und Wirkung von abflussverbessernden Maßnahmen auf Hochwasser der Elbe. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-1848, Koblenz. URL: <http://doi.bafg.de/BfG/2015/BfG-1848.pdf>

PROMNY, M., N. BUSCH, T. MAURER (2014): Ad-hoc-Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms. Teilbericht 1: Prüfung der von den Bundesländern gelieferten Unterlagen zu Maßnahmen und erste Abschätzung ihrer Wirkungen auf Hochwasser. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-1833, Koblenz. URL: <http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1833.pdf>

Dieser Beitrag erfolgte in Abstimmung mit den Kooperationspartnern:

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
Am Köllnischen Park 3
10179 Berlin

Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg
Henning-von-Tresckow-Straße 2-13, Haus S
14467 Potsdam

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern
Paulshöher Weg 1
19061 Schwerin

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz
Archivstraße 2
30169 Hannover

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt
Leipziger Straße 58
39112 Magdeburg

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung
Mercatorstraße 3
24106 Kiel



Kontakt:

Dr.-Ing. Markus Promny
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5028
E-Mail: promny@bafg.de

Koautoren:

Norbert Busch
Andrea Gleim
Matthias Hammer
Dr. Rita Ley
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

Jahrgang: 1976

1996 – 2001

Studium Bauingenieurwesen an der Technischen
Universität Berlin

2001 – 2007

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität
der Bundeswehr München, Promotion 2007

2007 – 2008

Post-Doc an der Versuchsanstalt für Wasserbau der
Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

seit 2008

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Bundesanstalt
für Gewässerkunde

Arbeitsschwerpunkt seit 2012:

2D-Abflussmodellierungen an Bundeswasserstraßen

Einsatz hydraulischer Modelle zur Verbesserung hydrologischer Grundlagen: Homogenisierung der langen HQ-Reihen (1890-2013) für Pegel der Elbe

Marcus Hatz

1 Veranlassung und Ziele

In der Vergangenheit wurden in verschiedenen Untersuchungen (u. a. BELZ et al. 2008) erhebliche Defizite in den hydrologischen Grundlagendaten für Pegel an der Elbe in Deutschland festgestellt. Diese äußerten sich hauptsächlich in mangelbehafteten Abflusskurven, widersprüchlichen Abflussbilanzen zwischen benachbarten Pegeln und missverständlichen Abflussentwicklungen im Längsprofil der Elbe. Zur Behebung dieser Defizite wurde 2006 das BfG-Projekt „WQ-Elbe 1890“ aufgelegt (HELMS et al. 2016). Ein weiteres Problem wurde erst im EU-INTERREG-Projekt „LABEL“ (2008-2012) durch die Ergebnisse von großräumigen Simulationen mit Abflussmodellen des tschechischen Instituts für Wasserforschung (VÚV TGM) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) offensichtlich. Die eingesetzten Modelle ermittelten für die bedeutenden Hochwasser von August 2002, April 2006, Januar 2011 und Juni 2013 erhebliche Scheitelreduzierungen (mehrere Dezimeter) entlang der gesamten deutschen Binnenelbe, die auf den Betrieb der tschechischen und thüringischen Talsperren an Moldau, Eger und Saale zurückzuführen waren (BfG 2012, 2013; IKSE 2012).

Neben diesem erfreulichen Effekt für den Hochwasserschutz der Unterlieger an der Elbe in Deutschland verursachte die sukzessive Inbetriebnahme von Talsperren im deutschen und tschechischen Elbegebiet, im Wesentlichen zwischen 1933 (Talsperre Bleiloch/Saale) und 1968 (Talsperre Nechranice/Eger), allerdings auch eine nicht zu vernachlässigende physikalische Inhomogenität in den langen Reihen (1890-2013) der Jahreshöchstabflüsse (HQ) der Elbepegel. Abgelaufene Hochwasser (bzw. gemessene Werte der HQ-Reihen) konnten in der jüngeren Vergangenheit einem deutlich größeren Talsperreneinfluss unterliegen als vergleichbare Ereignisse, die den Anfang der langen Reihen bilden. Aufgrund dieser Inhomogenität waren die Reihen für die Ermittlung der Extremwertstatistik an Elbepegeln (nicht nur in Deutschland) immer in Diskussion, weshalb in Tschechien bereits im Jahr 2006 für die dortigen Pegel eine Homogenisierung der HQ-Reihen erfolgte (KAŠPÁREK et al. 2006).

Mit dem Ziel der „Homogenisierung von HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel“ nahmen die Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) und die BfG im Mai 2013 diese Aufgabe im Rahmen einer gemeinsamen Kooperation ebenfalls in Angriff (BfG 2018).

2 Vorgehensweise und hydraulisches Modellsystem

Seit den richtungsweisenden Untersuchungen der Hochwasser-Studienkommission am Rhein in den 1970er-Jahren (HSK 1978) ist in Deutschland Stand der Technik, durch Ausbaumaßnahmen bedingt inhomogene, lange HQ-Reihen in großen Flusseinzugsgebieten mittels Einsatz überregionaler mathematischer Abflussmodelle zu homogenisieren. Mehrere zustandsbezogene Modellsysteme bilden hierfür die zentralen Instrumente, um die instationären Wirkungen von bedeutsamen Veränderungen im bzw. am Gewässer (im vorliegenden Projekt sind dies die Talsperren) auf Hochwasserabläufe und Scheitelabflüsse quantifizieren zu können. Grundsätzlich sollte jeweils ein kalibriertes Abflussmodell vorliegen, das den Hochwasserablauf zum Eintrittszeitpunkt eines Ereignisses abbilden kann („wie *abgelaufen*“). Ein Modell für den heutigen Gewässerzustand wird benötigt, wenn es Ziel der Homogenisierung ist, die aktuelle Wirkung der Talsperren vollständig in den HQ-Reihen zu berücksichtigen („wie *heute*“/, 2013“). Soll der Bezug auf einen „natürlichen“ Zustand erfolgen und somit die Effekte der Talsperren aus den inhomogenen HQ-Reihen eliminiert werden, dann wird ein weiteres Modell ohne Berücksichtigung der Talsperren benötigt („wie *natürlich*“/, 1890“).

Im Rahmen des Projekts war es nicht möglich, für die gesamte Binnenelbe (und die Saale) – zusätzlich zum existierenden Modell (Abb. 1A) für den aktuellen Zustand („wie *heute*“ bzw. „wie *abgelaufen*“) – ein hydraulisches Abflussmodell aufzubauen, das den Gerinnezustand 1890 („wie *natürlich*“) beschreibt. Eine Mindestanforderung war jedoch, dass die Wirkung der Talsperren in Tschechien mit verschiedenen mathematischen Modellen für den historischen (Abb. 1C-I) und aktuellen Zustand (Abb. 1C-II) für Moldau und Eger ermittelt werden kann (BALVÍN & KREJČÍ 2017). Für die beiden Talsperren Bleiloch und Hohenwarte im Oberlauf der Saale in Thüringen war es aufgrund des räumlich konzentrierten Veränderungsreichs hinreichend genau, deren Wirkungen durch Bilanzbetrachtungen auf Hochwasser am Pegel Kaulsdorf (Saale-km 281) zu parametrisieren. Kaulsdorf liegt unmittelbar unterhalb der sogenannten „Saalekaskade“ und bildet die obere hydrologische Randbedingung des projektbezogen aufgebauten Wellentransformationsmodells (WTM-Modell, Abb. 1B) der Saale, das bis nach Halle-Trotha (Saale-km 89,1) reicht. Sowohl das tschechische Modellsystem als auch das WTM-Modell der Saale wurden durch Übergabe der Ergebnisse an den Randbedingungen (Ústí n. L. bzw. Halle-Trotha) an das durch die BfG betriebene hydrodynamische 1D-SOBEK-Modell der Elbe und Saale gekoppelt, so dass instationäre Nachweisrechnungen bis zum Wehr Geesthacht (Elbe-km 585,9) kurz vor den Toren Hamburgs möglich waren.

Nicht jeder in der inhomogenen Zeitreihe 1890-2013 (Abb. 5, rote Säulen) aufgeführte jährliche Höchstabfluss für die untersuchten deutschen Pegel an der Elbe kann mit den zuvor beschriebenen Modellen in einen homogenen Zustand „1890“ bzw. „2013“ (Abb. 5, schwarze bzw. blaue Säulen) umgerechnet werden. Gemäß den Modelllayouts werden allein für die Simulationsberechnungen auf der deutschen Modellstrecke annähernd 50 (hochaufgelöste) Abflussganglinien aller bedeutsamen Zuflüsse (Modellrandbedingungen) und der Auswertepiegel benötigt, um die Hochwasser in ihren raumzeitlichen Ausprägungen adäquat abbilden zu können. Somit stellt die Verfügbarkeit von hydrologischen Daten den limitierenden Faktor der gesamten Untersuchung dar. Zwar existieren für die Elbepegel i. d. R. lange Beobachtungsreihen gemessener (täglicher) Wasserstände und Abflüsse, für die Pegel an den benötigten Zuflüssen ist dies jedoch bei Weitem nicht gegeben. Die im Projekt eingesetzte Methode der HSK umgeht dieses Problem, indem lediglich für eine Auswahl von 30 charakteristischen Hochwassern zwischen 1970 und 2013 (vgl. Abb. 2) Nachrechnungen mit verschiedenen

Modellzuständen erfolgten und darauf basierend gesicherte Beziehungen zwischen berechneten Scheitelabflüssen verschiedener Gewässerzustände hergestellt wurden. Im Weiteren dienten diese „Transformationsfunktionen“ dann als Umrechnungsvorschriften zur Generierung homogener HQ-Reihen (vgl. Kapitel 4).

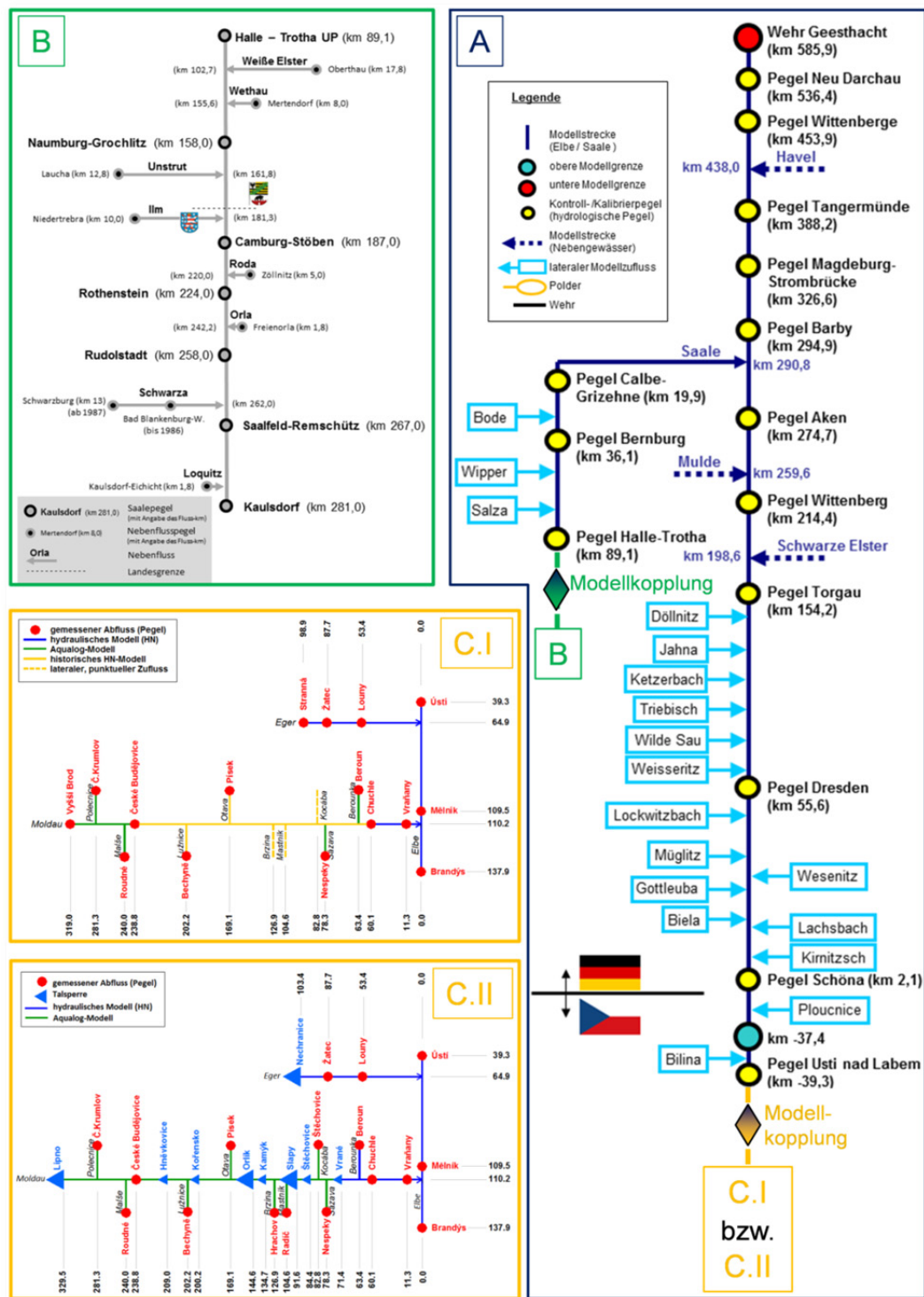


Abb. 1: Layout der im Projekt eingesetzten, gekoppelten Modelle: **A** – SOBEK-Modell der Elbe und Nebenflüsse (BfG); **B** – WTM-Modell der Saale zwischen Kaulsdorf und Halle (BfG); **C.I** und **C.II** – Modelle für Moldau, Eger und Elbe in Tschechien (C.I – historischer Zustand; C.II – aktueller Zustand; Aqualog Consulting)

3 Ausgewählte Ergebnisse der hydraulischen Modellierung

Insgesamt bestätigt sich für eine Vielzahl der 30 untersuchten Hochwasser, dass Scheitelreduktionen, die durch Talsperren in Tschechien und an der Saale in Thüringen hervorgerufen werden, überregional, d. h. großräumig über weite Strecken der deutschen Binnenelbe, wirksam sind. Durch den Vergleich der berechneten Scheitelabflüsse für die Zustände „1890“ und „2013“ (die zwei von insgesamt sechs analysierten Modellzuständen repräsentieren, vgl. BfG 2018) lässt sich für die untersuchten Hochwasser die maximale Bandbreite der scheitelreduzierenden Wirkungen für alle Auswertepegel zwischen Prag-Chuchle (Moldau) und Neu Darchau (Elbe) ermitteln (Abb. 2). Bis weit nach unterstrom an der deutschen Mittel- und Unterelbe wurden im Maximum bedeutende Scheitelabflussreduktionen bis zu $>800 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tangermünde/Hochwasser vom April 2006; vgl. Abb. 2, rote Linie) berechnet.

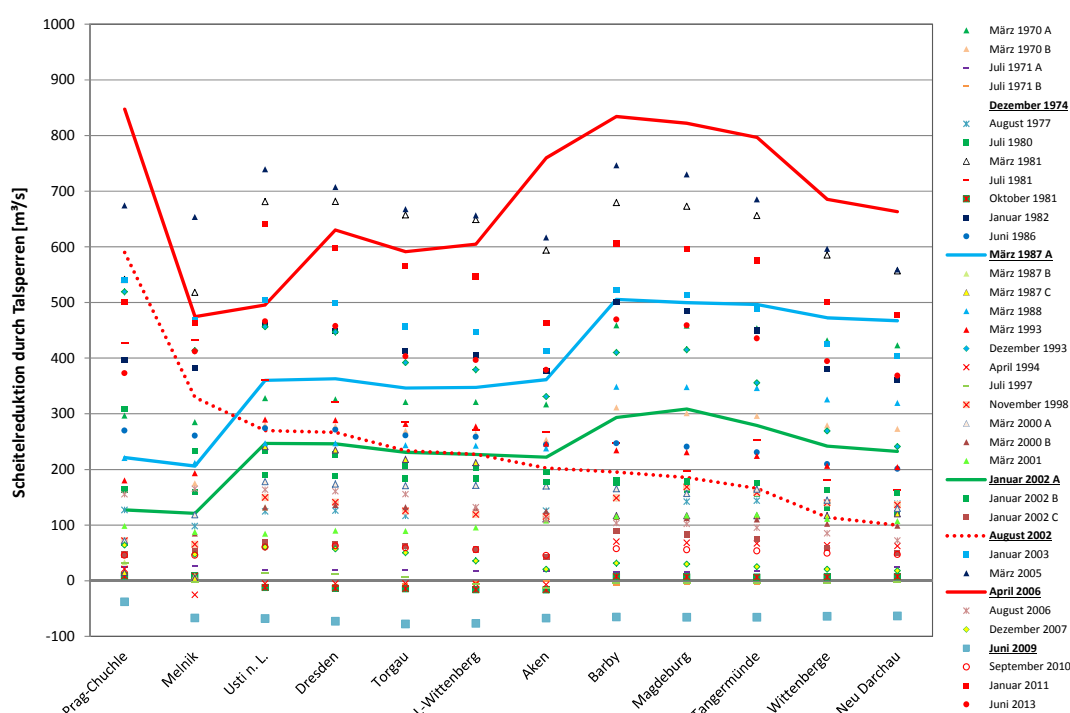


Abb. 2: Maximale Bandbreite der Talsperrenwirkung 30 Hochwasser an den Pegeln zwischen Prag-Chuchle (Moldau) und Neu Darchau (untere Mittel- und Unterelbe); berechnet aus dem Vergleich der modellierten Scheitelabflüsse für die Modellzustände „1890“ und „2013“. Ereignisse mit mehreren Scheiteln unterteilt in „A“, „B“ und „C“ (BfG 2018)

Markant sind in Abb. 2 die für mehrere Hochwasser sichtbaren „Sprünge“ in den modellierten Scheitelreduktionen zwischen Mělník (unterhalb der Moldaumündung) und Ústí n. L. (bspw. für das Hochwasser vom März 1987A; $\sim \text{HQ}_1$; blaue Linie) sowie zwischen Aken und Barby (z. B. für das Hochwasser vom Januar 2002A; $\sim \text{HQ}_2$; grüne Linie). Sie treten immer dann auf, wenn Talsperrenwirkungen an den Nebenflüssen in besonderem Maße auch für die Elbe wirkten. Beim Hochwasser vom August 2002 (gepunktete, rote Linie) ist dies beispielsweise nicht der Fall, weil die Saaletalsperren aufgrund des geringen Abflusses der Saale ($\sim \text{MQ}$) keinen Beitrag zur Scheitelreduktion an der Elbe liefern konnten.

Betrachtet man die modellierten Wirkungen der Saaletalsperren isoliert (nicht dargestellt, vgl. BfG 2018), dann zeigt sich, dass ihr Einsatz bei einzelnen Ereignissen des untersuchten Hochwasserkollektivs eine bis zu $\sim 175 \text{ m}^3/\text{s}$ große Scheitelreduktion an der Elbe am Pegel Barby (ca. 5 km unterstrom der Saalemündung in die Elbe) hervorrufen kann. Bei bedeutenden Elbe- und Saalehochwassern (wie im April 2006 oder Juni 2013) kann dieser Einfluss $\sim 2 \%$ des Scheitelabflusses, bei anderen Ereigniskonstellationen (bspw. mit großem Saale-, aber vergleichsweise kleinem Elbehochwasser) bis zu 6 % der Abflussspitze der Elbe ausmachen.

Zwischen 1890 und 2013 waren, zusätzlich zur Inbetriebnahme der großen Talsperren im Einzugsgebiet, weitere Veränderungen an der Elbe mit potenziell bedeutenden Auswirkungen auf ihren Wellenablauf und die Scheitelabflüsse zu verzeichnen. Im Expertenkreis und in Publikationen aus den 1980er- und 1990er-Jahren (SIMON 1983, 1996) wurden Vermutungen geäußert bzw. Untersuchungen (ohne Modelleinsatz) durchgeführt, die Anlass im Projekt gaben, mögliche Effekte durch den Verlust von natürlichen Überschwemmungsflächen in Folge von Eindeichungen an der Elbe seit 1890 und des Baus von Absperrbauwerken an Nebenflussmündungen seit Mitte der 1930er-Jahre ($>1.100 \text{ km}^2$) ebenfalls zu analysieren.

Mit der Digitalisierung und GIS-basierten Auswertung des Elbstromwerks (Elbstrombauverwaltung 1898) ist es gelungen, die Flächenermittlung von verlorengegangenen Überschwemmungsflächen an der Elbe auf stabilere Beine zu stellen. Weitere Anstrengungen sind jedoch notwendig, um historische hydrologische und geodätische Daten aufzubereiten und sie mittels hydraulischer Modelle für Wirkungsnachweise (entsprechend der Analysen der Talsperren) in Wert zu setzen. Im Zuge des Projekts konnten die genannten Einflüsse lediglich auf Basis von einfachen Anpassungen des vorliegenden 1D-SOBEK-Modells der Elbe und exemplarisch für das Hochwasser vom April 2006 abgeschätzt werden (Abb. 3). Dabei wurde bestätigt, dass sich die Effekte der im Oberlauf der Elbe geschaffenen Talsperren gegenläufig zu den im Unterlauf verlorenen Retentionsflächen verhalten können, und dass der Verlust von natürlichem Retentionsraum Auswirkungen in einer Größenordnung von mehreren $100 \text{ m}^3/\text{s}$ auf die Scheitel großer Hochwasser (Abflusserhöhung) besitzen kann.

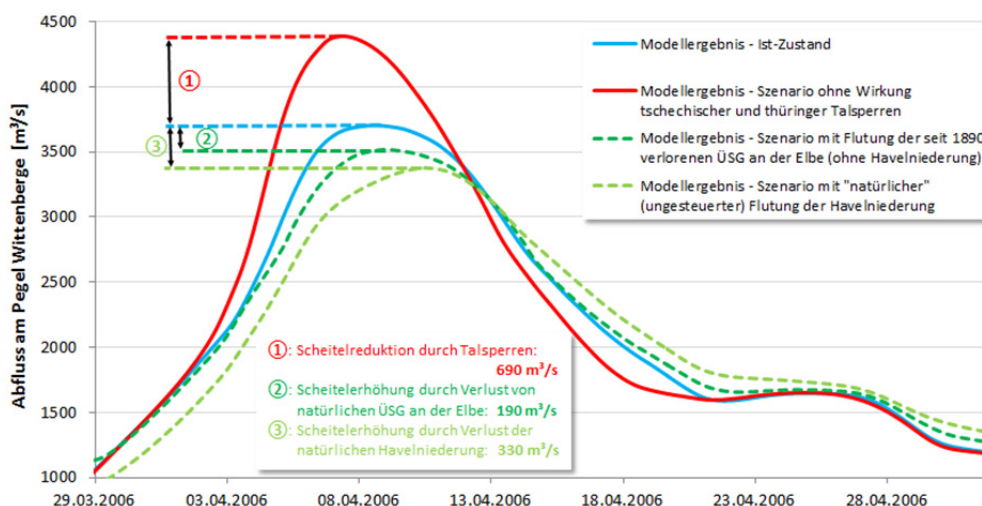


Abb. 3: Vergleich von berechneter Talsperrenwirkung und abgeschätzter Wirkung aufgrund des Verlusts von natürlichen Überschwemmungsflächen der Elbe am Pegel Wittenberge beim Hochwasser vom April 2006 (verändert nach BfG 2018)

4 Homogenisierung der langen HQ-Reihen und darauf basierende Aktualisierung der Extremwertstatistik

Obwohl Abb. 3 die potenzielle Bedeutung der in der Vergangenheit verlorenen Überschwemmungsflächen für den Hochwasserwellenablauf an der Elbe beschreibt, konnten – vor allem aufgrund des Fehlens eines hydraulischen Modells für den Zustand der Elbe zum Ende des 19. Jahrhunderts – deren scheitelwirksamen Effekte nicht in der Homogenisierung der langen HQ-Reihen berücksichtigt werden. Den Ausgangspunkt für die Ableitung von Transformationsfunktionen (vgl. Kapitel 2) bildeten somit die für sechs verschiedene Talsperreneinflüsse (vgl. Kapitel 3) zustandsbezogen modellierten Scheitelabflüsse des in Abb. 2 dargestellten Kollektivs der 30 untersuchten Hochwasser. Die darauf basierenden Umrechnungsvorschriften sind linear, unterscheiden zwischen Sommer- und Winterereignissen und beschreiben grundlegende hydrologische Zusammenhänge zwischen Wellenablauf und Scheitelbeeinflussung durch Talsperren. Alle Transformationsfunktionen wurden nach dem gleichen regressionsbasierten Vorgehen ermittelt, sie sind jedoch für jeden Pegel unterschiedlich. Für die insgesamt neun Elbepegel (von Dresden bis Neu Darchau) mit inhomogenen HQ-Reihen wurden im Projekt insgesamt 180 Sommer-Winter-differenzierte-Transformationsfunktionen aufgestellt und angewendet. Hiermit konnten die jeweils vorliegenden inhomogenen HQ-Reihen in (bzgl. der Talsperreneinflüsse) homogene Reihen im Zustand „1890“ (ohne Talsperren) und „2013“ (mit heutigem Talsperreneinfluss) umgerechnet werden.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft für den Pegel Wittenberge die für das Hochwasserkollektiv modellbasiert berechneten Scheitelabflüsse im heutigen Zustand „2013“ (mit Talsperren) und im Zustand „1890“ (ohne Talsperren) sowie die daraus getrennt für Sommer- (rote Gerade) und Winterereignisse (blaue Gerade) abgeleiteten Transformationsfunktionen zur Umrechnung von HQ-Werten zwischen beiden Zuständen.

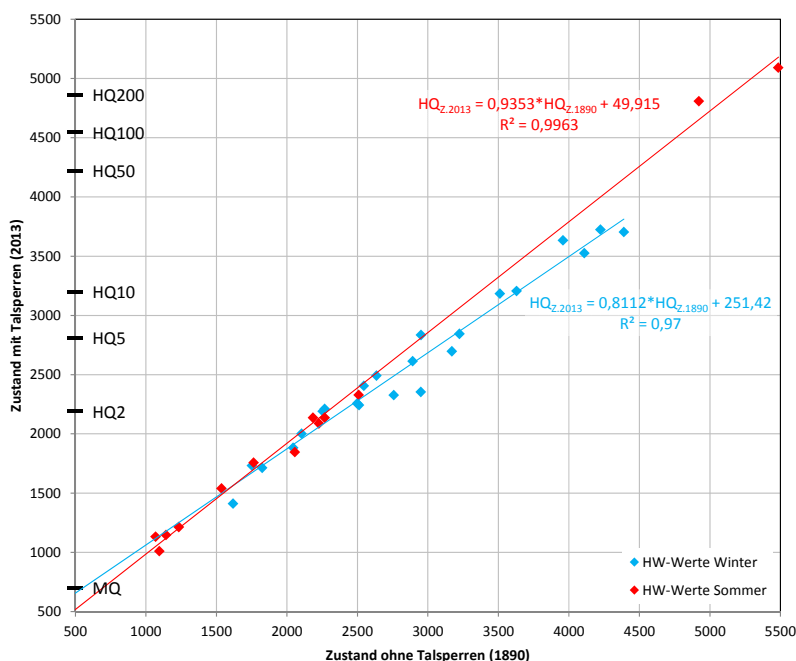


Abb. 4: Sommer-Winter-differenzierte Transformationsfunktionen für den Pegel Wittenberge zur Umrechnung vom Zustand „1890“ in „2013“ (verändert nach BfG 2018)

Auf Beschluss der projektbegleitenden Expertengruppe waren die inhomogenen HQ-Reihen sowohl auf Basis der offiziell gültigen Abflusskurven (OD) als auch auf Grundlage der im Projekt „WQ-Elbe 1890“ (WQE; siehe Kapitel 1) erarbeiteten, verbesserten Abflusskurven zusammenzustellen, um darauf aufbauend jeweils homogenisierte HQ-Reihen ohne („1890“) und mit Talsperreneinfluss („2013“) zu generieren. Insgesamt wurden den abschließenden extremwertstatistischen Berechnungen somit 6 HQ-Reihen (2 inhomogene und 4 homogenisierte Reihen) für jeden Pegel zugeführt. Für den Pegel Wittenberge werden in Abb. 5 (linke Ordinate, Säulen mit Füllung) sowohl die grundlegende inhomogene Reihe (rote) als auch die beiden resultierenden homogenen Reihen mit („2013“; blau) und ohne Talsperrenwirkung („1890“; schwarz), jeweils auf Basis der WQE-Daten, dargestellt.

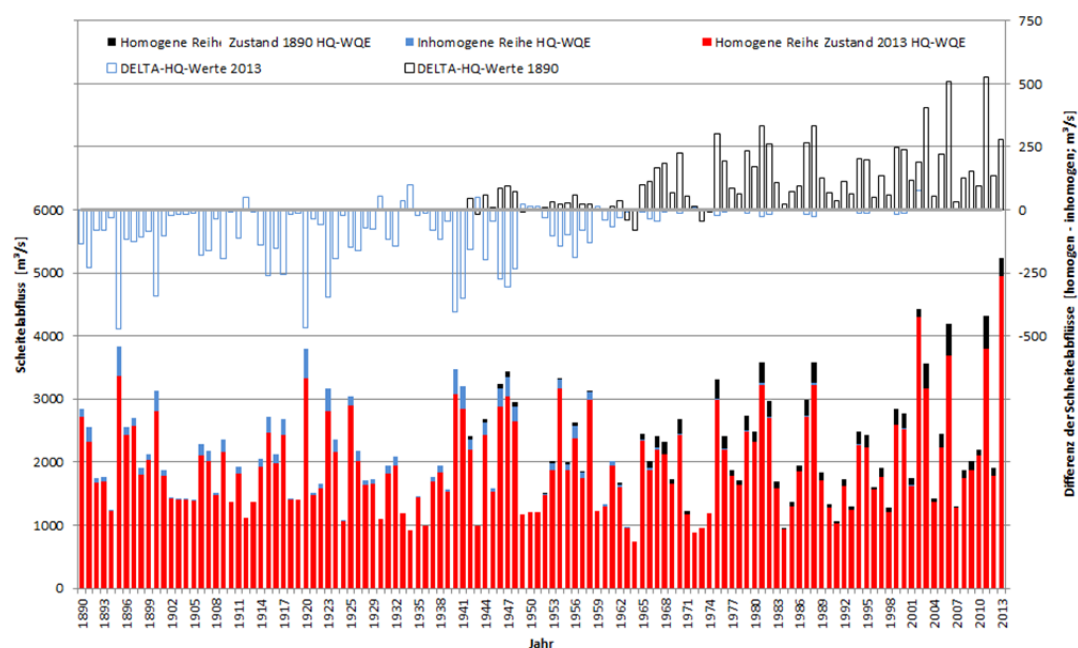


Abb. 5: Scheitelabflüsse der inhomogenen HQ-Reihe und der homogenisierten Reihen im Zustand „1890“ und „2013“ sowie der Scheiteldifferenzen zwischen inhomogener und homogenisierten Reihen auf Basis der Projektdaten (WQE) am Pegel Wittenberge

Die ebenfalls in Abb. 5 abgebildeten Differenzen der HQ-Werte (rechte Ordinate, Säulen ohne Füllung) zwischen inhomogener und homogener, vollständig durch Talsperren beeinflusster Reihe („2013“; blau) zeigen die bis zu etwa $-500 \text{ m}^3/\text{s}$ großen Reduktionen der Werte bei Homogenisierung in den Zustand „2013“. Mit im zeitlichen Verlauf zunehmendem Talsperreneinfluss verringert sich diese Korrektur der inhomogenen Werte. Gegenläufig verhalten sich die Differenzen für die Homogenisierung in den Zustand ohne Talsperrenwirkung („1890“; schwarz) – hier erfahren die jüngeren HQ-Werte die größten Scheitelabflusserhöhungen ($\sim +500 \text{ m}^3/\text{s}$), während die frühen Werte der langen HQ-Reihe unverändert bleiben.

Die auf Basis der zwei inhomogenen und vier homogenen Reihen ermittelten Ergebnisse für die Extremwertstatistik wurden sowohl nach numerisch-statistischen Kriterien als auch pegelbezogen und im Längsschnitt der Elbe hinsichtlich ihres hydrologisch zu erwartenden Verhaltens plausibilisiert. Sie belegen, dass überregionale Auswirkungen der Talsperren auf die Hochwasserscheitel von häufigen, mittleren und seltenen Hochwassern der Elbe zu erwarten sind, die weit über die Obere Elbe und die obere Mittelelbe hinausreichen. Entsprechende

Einflüsse (berechnet als Differenz zwischen den HQ_T -Werten mit/ohne Talsperreneinfluss) können in Abhängigkeit von Jährlichkeit und Pegelstandort bis zu mehrere 100 m³/s betragen. Die relative scheitelreduzierende Wirkung der Talsperren (ausgedrückt in % vom natürlichen, unbeeinflussten HQ_T -Wert des Zustands „1890“; Abb. 6) ist in der Regel im Bereich von HQ_{10} bis HQ_{20} am größten, sie nimmt im Längsprofil der Elbe mit zunehmender Entfernung des Pegels bzw. des Wirkraums von den Speichern ab.

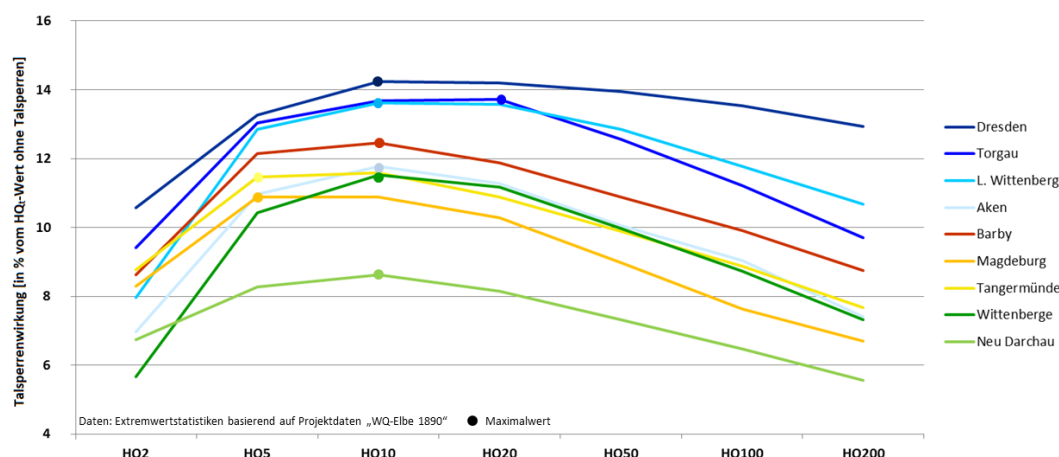


Abb. 6: Ausmaß der Talsperrenretentionswirkung bei unterschiedlichen Hochwasserjährliehkeiten; berechnet in % des jeweiligen HQ_T -Werts im Zustand „1890“ ohne Talsperren, Datenbasis: WQE-Daten (BfG 2018)

5 Ausblick und Empfehlungen

Durch die erfolgreiche Zusammenarbeit von Institutionen des Bundes, der Bundesländer, Tschechiens und der IKSE liegen nunmehr homogenisierte HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren vor. Auf deren Basis ließen sich, auch aufgrund der parallel dazu erreichten Verbesserungen im Projekt „WQ-Elbe 1890“, nun deutlich fundierter als bisher aktualisierte Hochwasserstatistiken für deutsche Elbepegel gründen. Mit Abschluss des Projekts konnten darüber hinaus erhebliche Fortschritte beim Thema Hochwasserhydrologie der Elbe erzielt werden, die nun weiteren Forschungs- und Abstimmungsbedarf zur Folge haben. Es wird empfohlen, noch bestehende Unsicherheiten in den jetzt vorliegenden HQ-Reihen (v. a. hinsichtlich der Wirkung der seit 1890 verlorengegangenen Überschwemmungsflächen) mittelfristig mit weiter verbesserten hydraulischen Modellen (ggf. auf Basis von rekonstruierten hydrologischen sowie morphologischen Grundlagendaten) zu eliminieren.

Im Rahmen der internationalen Abstimmung wird es als zielführend angesehen, die Vorgehensweisen zur Homogenisierung von HQ-Reihen in Deutschland und Tschechien zu harmonisieren. Um die nach fachlich-hydrologischen Gesichtspunkten ermittelten Projektergebnisse zeitnah einer nachhaltigen Nutzung (bspw. für Planungszwecke oder zur zukünftigen Ereignisanalyse) verfügbar zu machen, ist es notwendig, den im März 2018 im Rahmen eines FGG-Expertengesprächs mit Pegelbetreibern und Stakeholdern begonnenen Diskurs zum Umgang mit den vorliegenden Untersuchungsergebnissen fortzusetzen. Vor dem Hintergrund, dass die erzielten Projektergebnisse einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des hydrologischen Expertenwissens an der Elbe liefern, wird empfohlen – nicht nur in diesem

Findungsprozess sondern grundsätzlich – eine klare Trennung zwischen der Ermittlung hydrologischer Grundlagen und den sich ggf. daran orientierenden Festlegungen für wasserwirtschaftliche Zwecke (bspw. von BHQ) vorzunehmen. Somit kann sowohl heute als auch zukünftig vermieden werden, dass die (angewandt) wissenschaftliche Ermittlung hydrologischer Grundlagen unter einen Nutzungsvorbehalt gestellt wird.

Literatur

- BALVÍN, P., J. KREJČÍ (2017): Homogenisation Project (2013-2016). Interner Projektabschlussbericht zur Beauftragung durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (unveröff.)
- BELZ, J.-U., J. ILSE, R. OPPERMAN (2008): Hochwasserstatistik für ausgewählte Elbepegel. Bundesanstalt für Gewässerkunde Bericht-1589. Koblenz
- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2012): Bewertung von Einflüssen tschechischer und Thüringer Talsperren auf Hochwasser an Moldau und Elbe in Tschechien und Deutschland mittels Einsatz mathematischer Modelle. Bericht-1725. Koblenz
- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013): Wirkungen von Deichbrüchen, von gesteuerten und ungesteuerten bestehenden Rückhaltungen sowie von geplanten Maßnahmen auf das Hochwasser im Mai/Juni 2013 an der Elbe. Kurzbericht im Auftrag des BMUB. Koblenz (unveröff.)
- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2018): Homogenisierung der HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren. Bericht-1938. Koblenz, in Vorbereitung
- Elbstrombauverwaltung (1898) (Hrsg.): Der Elbstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse. 3 Textbände, Atlas und Tabellenband. Königliche Elbstrombauverwaltung zu Magdeburg. Berlin: Reimer Verlag
- HELMS, M., J. IHRINGER, R. MIKOVEC, R. (2016): Überarbeitung der Abflussreihen und Abflusstafeln für die Elbe (Zeitraum 1890-2006). Unveröffentlichter Entwurf des Endberichts im Auftrag der BfG. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT, Karlsruhe
- HSK (1978) (Hrsg.): Schlussbericht der Hochwasser-Studienkommission (HSK) für den Rhein: Ergebnisse über die Hochwasser und ihre Entwicklungen von Beginn der Aufzeichnungen an, die Einflüsse des Ausbaus des Rheins, seiner Nebenflüsse und der Seen auf das Hochwasser, den derzeitigen Stand des Hochwasserschutzes sowie Empfehlungen für Maßnahmen gegen die vergrößerte Hochwassergefahr, Bonn: BMV
- KAŠPÁREK, L., O. NOVICKÝ, M. JENÍČEK, Š. BUCHTELA (2006): Influence of large reservoirs in the Elbe River basin on reduction of flood flows. Prag: T.G. Masaryk Institut für Wasserforschung
- IKSE – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2012) (Hrsg.): Abschlussbericht über die Erfüllung des „Aktionsplans Hochwasserschutz Elbe“ (2003-2011), Magdeburg
- SIMON, M. (1983): Auswirkungen wasserbaulicher Maßnahmen auf den Hochwasserablauf der Elbe. Magdeburg, Wasserwirtschaftsdirektion Untere Elbe
- SIMON, M. (1996): Anthropogene Einflüsse auf das Hochwasserabflussverhalten im Einzugsgebiet der Elbe. Wasser und Boden, Heft 2, S. 19-23



Kontakt:

Marcus Hatz

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5574
E-Mail: hatz@bafg.de

Jahrgang: 1983

2003 – 2009

Studium der Geoökologie an der Universität
Karlsruhe (KIT)

seit 2009

Wissenschaftlicher Angestellter der Bundesanstalt
für Gewässerkunde, Koblenz

Projektbearbeitung:

2009 – 2012: EU-INTERREG-Projekt „LABEL –
Anpassung an das Hochwasserrisiko
im Elbe-Einzugsgebiet“

seit 2009: Ansprechperson für die Weiterent-
wicklung des Flusshydrologischen
Fachdienstes FLYS in der BfG

2011 – 2013: KLIWAS-Projekt 4.05 „Prozessstudien
zur Weiterentwicklung der Eisbildung
auf Wasserstraßen“

2013 – 2018: FGG-BfG-Projekt „Homogenisierung
der langen HQ-Reihen an der Elbe“

seit 2015: Projektkoordinator für das FuE-
Vorhaben zum Nationalen Hoch-
wasserschutzprogramm (NHWSP)

Bereitstellung hydrologischer Grundlagen – Fachdienst FLYS der BfG

Norbert Busch

1 Einleitung



Am 1. Juli 2013 wurde der Online-Fachdienst FLYS der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) eröffnet. In mehreren Entwicklungszyklen entstand in Zusammenarbeit mit hydrologischen Dienststellen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) seit 1998 ein umfassendes Informations- und Analysesystem für die Hydrologie, Morphologie und Ökologie an Bundeswasserstraßen (BWaStr). Im Sinne einer multifunktionalen App kann sich der Nutzer mit dem Fachdienst FLYS via Geoportal GGInA der BfG bei Zugriff auf autorisierte Datensätze und nach Auswahl bekannter und neuer Auswerterroutinen unterschiedliche Informationen für beliebige Standorte an BWaStr ermitteln und diese analysieren.

Eine klassische Frage in der Gewässerkunde lautet: „Welcher Wasserstand stellt sich an einem beliebigen Ort eines Gewässers in Abhängigkeit vom (stationären) Abfluss ein“? FLYS gibt hierauf Antwort mit großer Genauigkeit.

„FLYS ist kein hydraulisches Modell, sondern ein Instrument zur Verarbeitung von Modellergebnissen vor dem Hintergrund gemessener Daten. Es interpoliert zwischen den Ergebnissen, visualisiert und interpretiert diese zusammen mit weiteren Informationen und fügt so die passenden Teile zusammen: Mess- und Modell-, Bundes und Länderdaten, historische und aktuelle, geodätische, hydrologische und morphologische Daten.“ (www.bafg.de/FLYS)

Wasserstände, Überschwemmungsgebiete und Strömungsverhältnisse stellen wichtige lebensraumbestimmende, abiotische Größen in und an Gewässern dar. Da der Fachdienst hierzu auskunftsfähig ist, hat er sich seit Einführung der Online-Version auch in der Gewässerökologie zu einem vielgenutzten Informationsinstrument etabliert. Somit steht FLYS als ein Sinnbild für die Interdisziplinarität der Gewässerkunde.

2 Der Fachdienst FLYS, Intentionen und Hintergrundinformationen

Der Einsatz großräumiger numerischer Abflussmodelle für die gewässerkundliche Ist-Beschreibung der BWaStr bildet einen wesentlichen Bestandteil im Angebotsportfolio des Aufgabengebiets „Fließgewässermodellierung“ der BfG (BUSCH 2018). Diese Modellierungen gründen auf einen Erlass aus dem Jahre 2008 (BMVBS 2008). 1D- bzw. 2D-hydraulische Modelle werden für diesen Zweck zur Abbildung stationärer Abflusszustände angewendet,

um überall entlang der BWaStr gleichwertige Wasserspiegellagen zu berechnen, die das gesamte Spektrum von Abflüssen zwischen Niedrig- und Hochwasser abdecken. Ermittelte Wasserstände, Überschwemmungsgebiete und Fließgeschwindigkeiten sowie die für die Modellierung verwendeten Geobasisdaten und hydrologischen Messdaten werden in verschiedenen Datenbanken der BfG und der WSV gespeichert, gepflegt und über FLYS veröffentlicht. Vor ihrer Veröffentlichung werden Modellergebnisse mit den Dienststellen der WSV bzw. mit den jeweiligen Projektpartnern abgestimmt. Damit steht ein äußerst heterogener Datenpool in strukturierter Form nachhaltig den an gewässerkundlichen Informationen interessierten Teilnehmern des Fachdienstes FLYS zur Verfügung. Seit jeher zählt die zeitgemäße Art der Bereitstellung modellbasierter, hydrologischer Grundlagen für BWaStr zu den Kernaufgaben und zum Selbstverständnis der „Fließgewässermodellierung“. Da diese Grundlagen von allgemeiner Bedeutung sind, betrachtet sie diesen Service als ihre Bringschuld gegenüber den benachbarten Fachdisziplinen in der BfG und anderen Institutionen.

Die Nachnutzung hydraulisch berechneter Wasserspiegellagen mithilfe maßgeschneiderter spezieller Informationssoftware erfolgte erstmals 1998 im Auftrag des WSA Hann. Münden, um so für die Weser im hydrologischen Dienst besser auskunftsfähig zu sein. Nachfolgend entstanden im Auftrag verschiedener WSÄ mehrere sog. „Stand-Alone-Programme“ zur Visualisierung und Auswertung hydraulischer Ergebnisse. Diese wurden nach erfolgter Ausschreibung der BfG im Jahre 2004 unter einer gemeinsamen Nutzeroberfläche FLYS (Fluss-hydrologische Software) zusammengeführt. Mit Abschluss des fünften Entwicklungszyklus wurde schließlich 2013 der Online-Fachdienst FLYS der BfG eröffnet. Seine Entstehungsgeschichte ist ausführlich in BUSCH (2013) dokumentiert. Jede der vorangegangenen Versionen entstand in enger Abstimmung mit ausgewählten Dienststellen der WSV, indem u. a. die aus dem Nutzerkreis gemeldeten Anforderungen umgesetzt wurden. So wuchsen mit jedem neuen FLYS-Release die Anzahl der implementierten Berechnungsarten, die Auswahl von optionalen Visualisierungs- und Auswertemöglichkeiten, die hinterlegten Daten für BWaStr und die Anzahl der registrierten Teilnehmer (s. Abb. 1).

Der Fachdienst FLYS versteht sich als ein innovatives Angebot der Gewässerkunde. Diese Aufgabe zu meistern, stellt eine nahezu immerwährende Herausforderung dar. Denn

- > der operationelle Wirkbetrieb sollte möglichst ohne große Unterbrechungen vom Fachbetrieb FLYS garantiert werden,
- > ein Informationssystem dieser Art setzt als Grundlage ein sachgerechtes Datenmanagement voraus, welches eine kompetente Nutzerbetreuung einschließt,
- > die FLYS-Software muss nutzerorientiert gemäß den Anforderungen ständig konsolidiert und nach Stand der Technik weiterentwickelt werden.

Diese Mindestanforderungen an einen Online-Dienst zu bedienen, erfordert Expertise und erhebliche Aufwendungen im federführenden Referat M2 „Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen“ und abteilungsübergreifend.

Nachfolgend werden die wesentlichen Intentionen und Hintergrundinformationen, die zum Fachdienst FLYS führten, näher beschrieben. Von Anfang an verkörpert FLYS die Idee des „virtuellen Pegels“. Für gewässerkundliche Zwecke und für den Betrieb der BWaStr betreibt und unterhält die WSV ein dicht geknüpftes Messnetz an Pegeln. Aktuell gemessene Wasserstände werden über Internetdienste (PEGELONLINE, ELWIS) veröffentlicht.

Auch für beliebige Orte zwischen den Pegeln existiert seitens unterschiedlicher Bedarfsträger schon immer eine Nachfrage zu Informationen über Wasserstände. Diese Wissenslücke auszufüllen, ist Anspruch der Fließgewässermodellierung im Allgemeinen und des Flusshydrologischen Fachdiensts im Besonderen. Die Idee des „virtuellen Pegels“ wurde zu einer Erfolgsgeschichte, da FLYS über alle Abflussbereiche kalibrierte und validierte, d. h. qualitativ hochwertige hydraulische Modelle für BWaStr voraussetzt und deren Ergebnisse nachnutzt. In FLYS werden somit in „schonungsloser“ Transparenz Modelldaten bereitgestellt, die unmittelbar an Messdaten überprüft und bewertet werden können. Angestrebt wird, dass die modellbasierten Wasserspiegellagen in etwa den Genauigkeitsstandard von Pegelmesswerten erreichen. Um dies zu ermöglichen, erfolgt die stationäre Kalibrierung der Modelle mit dem Ziel einer mittleren Abweichung von kleiner 5 cm zwischen Simulation und Messung. So vermag FLYS die Modelldaten überall im Sinne eines „virtuellen Pegels“ auszuwerten, den der Nutzer platzieren kann, wo er will. Das FLYS-Konzept hat offensichtlich viele Nutzer überzeugt.

Aktuell werden über den Fachdienst FLYS der BfG gemessene und berechnete Daten von 14 BWaStr für Informations- und Analysezwecke angeboten. Mit Stand 01.04.2018 machen 385 Teilnehmer aus Deutschland hiervon offiziell Gebrauch, indem sie sich nach schriftlichem Antrag registrieren ließen. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der registrierten Teilnehmer seit Eröffnung des Fachdienstes am 01.07.2013 (linkes Bild). Diese verteilen sich nahezu gleichmäßig auf Angehörige der BfG, der WSV/BAW, von Verbänden/Ingenieurbüros, aus den Verwaltungen von Ländern/Kommunen und von Universitäten (rechtes Bild). Momentan basiert der Wirkbetrieb des Fachdienstes auf der Version FLYS 3.2.1.

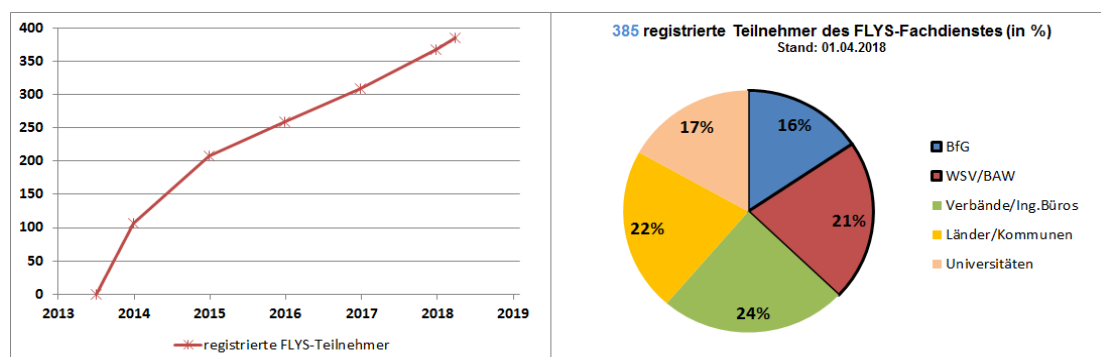


Abb. 1: Entwicklung der registrierten Teilnehmer am Fachdienst FLYS seit 01.07.2013 und institutionelle Zugehörigkeit der Teilnehmer

Angaben zu gemessenen Wasserständen (heute Tageswerte, früher Terminwerte) und Abflüssen an bedeutsamen Pegeln werden seit 1901 in den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern (DGJ) veröffentlicht. Darüber hinaus enthalten die Wasserstands- bzw. Abflussseiten jeweils auch aus Messdaten abgeleitete Angaben zu den gewässerkundlichen Hauptwerten, statistischen Extremwerten HQ_1 und HQ_5 , zu Dauerzahlen sowie die Ranglisten der niedrigsten und höchsten Messwerte seit Beginn der Beobachtungen. In Anlehnung an das DGJ bietet FLYS Auswertemöglichkeiten mit mehreren, im Modul W-INFO implementierten Berechnungsarten an, so dass für die „virtuellen Pegelstandorte“ gleichsam eine Entsprechung zu einer Jahrbuchseite herausgegeben wird. Beispielsweise lassen sich für die im DGJ angegebenen Tageswerte für beliebige Standorte bzw. Strecken im Gültigkeitsbereich des Pegels

mithilfe der Berechnungsart „Wasserstand/Wasserspiegellage“ die korrespondierenden Wasserstandsangaben ermitteln. Kombiniert man die im DGJ aufgeführten W- und Q-Seiten eines Pegels miteinander und trägt diese Werte in einem Diagramm auf, ergibt sich die gültige Abflusskurve des Pegels. FLYS kann in der Berechnungsart „Abflusskurve/Abflusstafel“ für beliebige Standorte Abflusskurven berechnen, diese darstellen und die Abflusstafel auslagern. Ökologen bevorzugen die Berechnungsart „Dauerlinie“, da die ermittelte Dauerlinienkurve als eine wesentliche Grundlage sehr gut zur ökologischen Beschreibung und Bewertung von beliebigen Standorten an BWaStr geeignet erscheint (SCHLEUTER 2010).

Seit Inbetriebnahme der Online-Version enthält FLYS im Modul M-INFO auch Berechnungsarten, die die Morphologie der BWaStr betreffen. In Tabelle 1 sind in einer Übersicht alle in der aktuell eingesetzten Version FLYS-3.2.1 implementierten Module (W-INFO, Fixierungsanalyse und M-INFO) aufgeführt sowie die darin wählbaren Berechnungsarten. Beispiele für die in Tabelle 1 genannten Berechnungsarten im Modul W-INFO sind in HATZ & TEICHMANN (2013) zusammengestellt. Zahlreiche Ergebnisdiagramme bei Anwendung der im Modul M-INFO bereitstehenden Auswerteroutinen finden sich in GRÄTZ et al. (2015).

Tabelle 2

Implementierte Module und Berechnungsarten in der aktuellen Version FLYS-3.2.1
(Stand: 01.03.2018)

Nr.	Modul	Berechnungsart in FLYS-3.2.1
1	W-INFO	Wasserstand/Wasserspiegellage
2		Überschwemmungsfläche
3		Abflusskurve/Abflusstafel
4		Historische Abflusskurven
5		Dauerlinie
6		W für benutzerdef. Abflusslängsschnitt
7		Differenzen
8		Bezugslinie
9	Fixierungsanalyse	Fixierungsanalyse
10	Fixierungsanalyse	Ausgelagerte Wasserspiegellage
11	M-INFO	Mittlere Sohlhöhe
12		Sohlhöhendifferenz
13		Sohlbeschaffenheit
14		Sedimentfracht
15		Fließgeschwindigkeit
16		Transport-Abfluss-Beziehung

Das Modul Fixierungsanalyse stellt ein Bindeglied zwischen Hydrologie und Morphologie dar. Es entstand wie die GIS-Werkzeuge zur Berechnung von Überschwemmungsflächen im Rahmen der Weiterentwicklung zum Release FLYS-2.0.4 im Jahre 2006. Dieses Modul setzt die besonderen Datenbestände aus Wasserspiegelfixierungen der WSV erstmals zur Gänze in Wert. In Zusammenarbeit mit der Hydrometrie wurde es als Instrument für ein Wasserspiegelmonitoring an frei fließenden BWaStr konzipiert. Hierin werden die Daten gemessener

Wasserstände für benutzerdefinierte Bezugsabflüsse ausgewertet, um streckenbezogene, zeitliche Wasserstandsänderungen zu identifizieren (BUSCH et al. 2013). Der Nachweis, ob ermittelte Änderungen tatsächlich im Zusammenhang mit langfristigen Sohlhöhenänderungen stehen bzw. sich als Auswirkungen von Maßnahmen an Gewässern einstellen, und welche Entwicklungen der Wassertiefen hieraus resultieren, erfolgt dann in gewässermorphologischen Untersuchungen. Im Rahmen des Projekts StroK (Stromregulierungskonzept) Elbe werden gegenwärtig das Wasserstandsverhalten auf zeitliche Änderungen (mit FLYS) untersucht und mittlere Sohlhöhenänderungen aufgrund von Feststoffbilanzuntersuchungen ermittelt, um auf deren Basis Ergebnisse des Feststofftransportmodells der BAW zu plausibilisieren. Ziel des Projekts StroK u. a. ist es, Erkenntnisse zur Ursache-Wirkungskette von rezenten Sohlhöhen- und Wasserstandsänderungen an der Elbe auf ein breites Fundament von Mess- und Modelldaten zu stellen. Vergleichbare hydrologische Untersuchungen anhand von Wasserspiegelfixierungen wurden zudem in der WSV-AG „Abladeoptimierung Mittelrhein“ vorgenommen. Hier konnten in der für die Rheinschifffahrt auch heute noch vorhandenen Nadelöhrstrecke zwischen Mainz und St. Goar von Ausbaumaßnahmen zwischen 1964 und 1976 zurückzuführende Wasserspiegelabsenkungen für niedrige Rheinabflüsse im Dezimeterbereich nachgewiesen werden (BUSCH 2017).

Die Software FLYS wurde ursprünglich als reines Informationsinstrument konzipiert. Der Fachdienst FLYS hingegen mit seinem umfassenden gewässerkundlichen Anspruch lädt Nutzer nach erfolgten Berechnungen (Tabelle 1) bei Bedarf zu weiteren Analysen ein. Vielfältige, in den Datenbanken gespeicherte, gemessene bzw. berechnete Daten können hierzu über den Datenkorb in Ergebnisdiagrammen vorgefiltert attribuiert werden. Der „intelligente“ Datenkorb wurde nach Nutzerwünschen in der vierten Entstehungsphase entwickelt, die 2009 mit der Version FLYS-2.1.3 abschloss (STÜRMER & ACKERMANN 2013). Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein Diagramm, das im Ergebnis einer Anwendung der ältesten, in FLYS integrierten Berechnungsart „Wasserstand/Wasserspiegellage“ erzeugt wurde. Hierin sind im Längsschnitt der Elbestrecke bei Hitzacker (Elbe-km 515-525) die mit FLYS auf Basis des aktuellen 1D-hydraulischen Modells der Elbe berechneten Wasserspiegellagen für MNQ, MQ, MHQ und HQ₁₀₀ dargestellt. Über den Datenkorb wurden für Vergleichs- und Analyse-zwecke zusätzlich der Talweg (2004), die gemessene Scheitelwasserstandslinie des Hochwassers 2013 und die Kronenhöhen der Deiche am rechten Elbufer importiert und im Ergebnisdiagramm (Bezug: linke Ordinate) dargestellt.

In der Differenzendarstellung zeigt Abb. 2 (rechte Ordinate) auch die Querneigungen des Wasserspiegels beim Hochwasser 2013 zwischen linkem und rechtem Ufer (bis zu 15 cm) sowie deutliche Wasserstandsunterschiede bzgl. der Gewässerachse für HQ₁₀₀ der Elbe bei Verwendung von Berechnungsergebnissen aus 1D- bzw. 2D-hydraulischen Modellen (bis zu 40 cm). Durch die Hinzunahme der mit dem aktuellen 2D-Modell der Elbe für HQ₁₀₀ berechneten Wasserspiegellagen für die Flussachse, linkes und rechtes Ufer soll bereits signalisiert werden, dass weiterentwickelte FLYS-Versionen sukzessive auf Basis von physikalisch fundierteren 2D-Modellergebnissen zukünftig wesentlich detailliertere Daten bereitstellen werden. Für deren Auswertung bedarf es neuer, kartengestützter Anwender Routinen, für die dem Fachdienst FLYS schon seit geraumer Zeit Anforderungen von Nutzern vorliegen. Wegen des weitgespannten Anwendungsrahmens ist die Gemeinschaft der FLYS-Nutzer inzwischen sehr heterogen zusammengesetzt. Techniker und Wissenschaftler wenden dieses Instrument gleichermaßen an, die Weiterverwendung von FLYS-Daten für eigene Zwecke liegt dabei in Verantwortung des Nutzers.

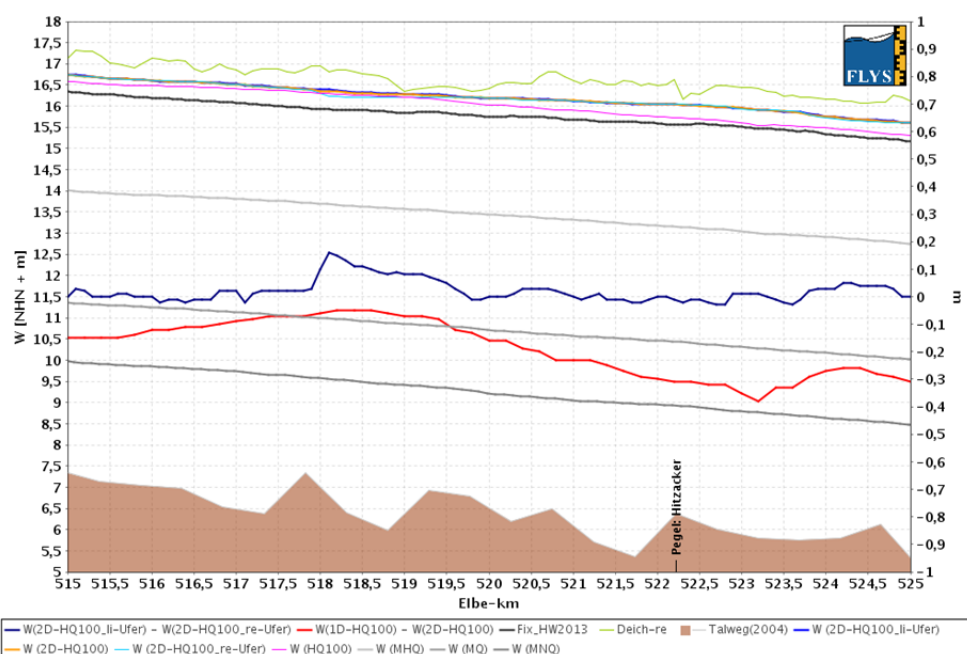


Abb. 2: Gemessene und berechnete Wasserspiegellagen (1D-/2D-Modelle) im Bereich der Elbestrecke bei Hitzacker und weitere Höhenlängsschnitte im Vergleich

Die bisherigen fünf Entwicklungsphasen der Software bzw. des Fachdienstes FLYS zwischen 1998 und 2013 standen ausnahmslos unter der Devise „Eine Anwendung von Anwendern für Anwender“. In der Fachsprache des Projektmanagements werden Projekte, die diesem Prinzip entsprechen, als „Bottom Up“-Projekte bezeichnet. Erfahrungen aus früheren Projekten in der BfG und WSV zeigen, dass diese Art von Konzepten große Aussichten auf Erfolg haben. Konkret bedeutet dies, dass die an die „Fließgewässermodellierung“ gerichteten Wünsche und Anforderungen aus dem Nutzerkreis zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Software zunächst gesammelt und gebündelt wurden. Danach erfolgte vom FLYS-Entwicklerteam in Federführung und Verantwortung für diesen Dienst die Konkretisierung aller Anforderungen, die Ressourcenakquise, die Vergabe zur Softwareentwicklung bis zur deren Abnahme. Projektleiter war in allen Fällen der Autor dieses Beitrags. Niemals wurden in den bisherigen fünf Entwicklungsphasen FLYS-Releases nach dem Prinzip „Ordre de Mufti“ erstellt, nur Nutzeranforderungen und eine umfassende Beteiligung fachlicher Stakeholder waren maßgeblich. Registrierte Nutzer können dem Fachdienst FLYS Fehler oder Verbesserungsvorschläge mitteilen, hierfür wurde zur Kommunikation zwischen Anbieter und Nutzer der Account FLYS-Fachdienst@bafg.de eingerichtet.

Die Idee zur Umwandlung der FLYS-Desktopversion in eine webbasierte Anwendung reifte im Nachgang des EU-Projekts „ELLA“ (2002-2006) auf Anraten des Projektpartners Sachsen, der die Desktopversion nutzte, diese für nicht mehr zeitgemäß erachtete und die Verantwortlichen in der BfG zu diesem Schritt ermutigte. Diese Umstellung stellte einen enormen und riskanten Entwicklungssprung dar. Zunächst wurden, nachdem Ressourcen aus dem EU-Interreg Projekt „LABEL“ (2008-2012) im ausreichendem Maße akquiriert waren, von dem FLYS-Entwicklerteam im Vorfeld der Ausschreibung der Webversion Interviews mit Nutzern in und außerhalb der BfG und früheren Entwicklern geführt. Es galt für die Webversion Akzeptanz und erforderliche Informationen zu erhalten sowie die Zusage der späteren Mitarbeit einzuwerben. In der Folge konnten im Zuge der Leistungserbringung neben den beteiligten Dienststellen der WSV in einer abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit alle Referate der Abteilung M und das Referat „Informationstechnik“ der BfG eingebunden werden.

Abbildung 3 zeigt aus damaliger Sicht das Geflecht von Teilaufgaben und Instanzen an dieser schwierigen Gemeinschaftsleistung in der BfG. Durch diese kompetente, kreative, konstante und kollegiale Kooperation (4k-Prinzip) gelang es, den Fachdienst FLYS in einer besonderen Kraftanstrengung zu realisieren. Somit steht der bisherige, jahrzehntelange Entwicklungsprozess von Stand-Alone-Programmen bis zum Start des Fachdienstes FLYS auf drei Standbeinen: 1) virtueller Pegel, 2) hochwertige hydraulische Modelle, 3) Bottom-Up Prinzip.

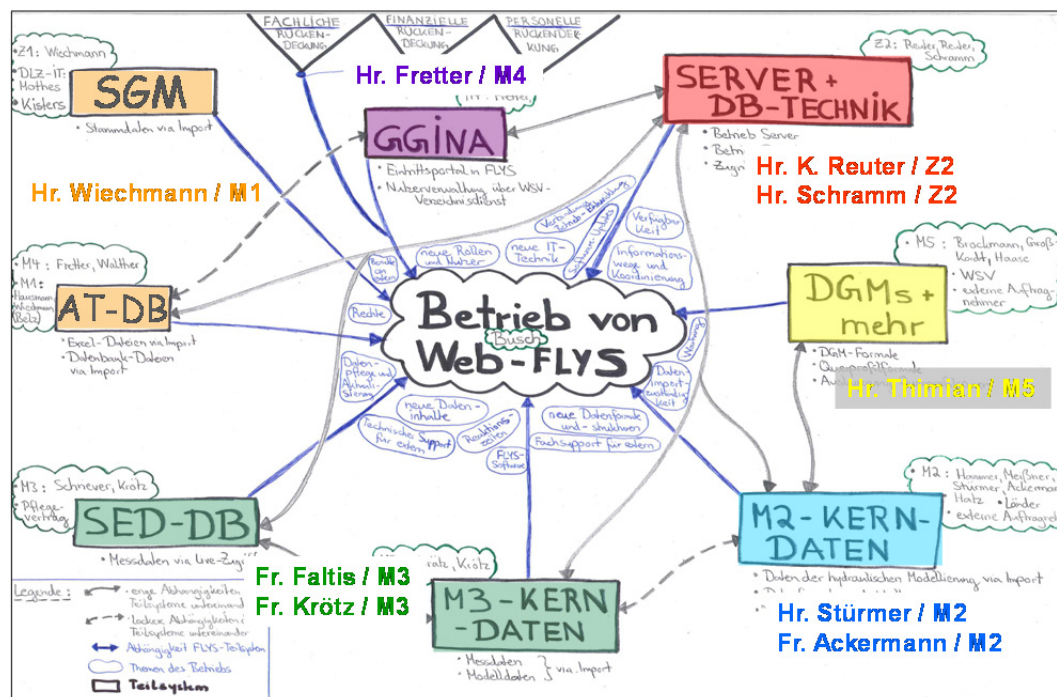


Abb. 3: Vernetzung von internen und externen Datenbanken und Diensten zum Betrieb des Online Fachdienstes FLYS; ursprüngliche Zeichnung: Marcus Hatz (2012)

3 Konsolidierung und Weiterentwicklung des Fachdienstes FLYS

Der Eröffnung des Fachdienstes FLYS im Jahr 2013 ging ein längerer Abwägungsprozess voraus. Es war von den Verantwortlichen des Fachdienstes zu entscheiden, ob trotz erkannter Defizite in der Software der Schritt zur Veröffentlichung opportun erschiene. Bewusst wurde für einen zeitnahen Start des Dienstes entschieden, da Ressortforschungsmittel des Bundes in Aussicht gestellt wurden, um im Rahmen eines anschließenden Projekts „Vernetzung von FLYS“ die erforderliche Konsolidierung und Weiterentwicklung des Fachdienstes FLYS zu bewerkstelligen. Anfang 2015 startete das Anschlussprojekt, es stellt den Beginn der nunmehr sechsten Entwicklungsphase zur Erstellung bzw. Weiterentwicklung der Software FLYS bzw. des Fachdienstes FLYS seit 1998 dar. Die vereinbarten Ziele und Arbeiten umfassen im Wesentlichen die Verbesserung der Qualität inkl. der Prozessierung von modellbasierten Daten sowie die Verbesserung und Weiterentwicklung der zugrundeliegenden FLYS-Software. Im Januar 2015 fand die BfG-Auftaktveranstaltung statt, an der abteilungsübergreifend alle bisher an der Entstehung des Fachdienstes FLYS beteiligten Referate teilnahmen. Diese bekräftigten übereinstimmend, auch weiterhin am Gelingen des Fachdienstes mitzuwirken.

Nach erfolgter Ausschreibung wurde im Juli 2017 im Rahmen dieses Projekts der Auftrag mit der Bezeichnung „Integrale Gewässerkundliche Datensicht in FLYS“ erteilt. Nachdem im Nachgang der Eröffnung des Fachdienstes bereits 2015 weitere Verbesserungen im Modul M-INFO erzielt werden konnten, sollen durch diese Beauftragung der Gewässermorphologie in der Konsolidierung der Software bekannte Mängel im Modul „Fixierungsanalyse“ beseitigt und zwei neue Module mit Schifffahrtsaspekten (S-INFO) und Umweltaspekten (U-INFO) mit zahlreichen Berechnungsarten erstellt werden. Außerdem ist die Umsetzung von Anregungen aus der WSV vorgesehen, jedoch keine Konsolidierung von erkannten Mängeln im Kernmodul W-INFO. Der Fachbetrieb FLYS, der auch federführend für die Konzeptionierung und Gesamtstrategie von FLYS ist, begleitet diese Ausschreibung v. a. hinsichtlich technischer Aspekte (Anbindung von Datenbanken, Softwaresymmetrie); der Abschluss dieser Arbeiten ist für 2019 vorgesehen.

Weitere Aktivitäten zur Konsolidierung und Weiterentwicklung des Fachdienstes FLYS sind ab Frühjahr 2018 im Aufgabengebiet „Fließgewässersmodellierung“ geplant, das die Federführung des Fachdienstes FLYS hat. Diese Arbeiten betreffen, falls hierfür Ressourcen im ausreichenden Maße bereitgestellt werden, die Implementierung von neuen modellbasierten FLYS-Datensätzen für mehrere BWaStr (1), die Anbindung von internen und externen Datenbanken (2) sowie grundlegende Arbeiten zur Verbesserung (3) und (4) und Erweiterung der Software (5):

- (1) Als Beleg für das über viele Jahre gewachsene Vertrauensverhältnis zwischen dem Anbieter und Nutzern des Fachdienstes FLYS kann die aktuelle Bestellliste für neue bzw. zu aktualisierende FLYS-Datensätze für BWaStr angesehen werden. Gegenwärtig werden in der Beauftragung von Dienststellen der WSV ein 1D-SOBEK-Modell für den staugeregelten Oberrhein zwischen Basel und Iffezheim sowie ein 2D-Modell für die Weser von Hann. Münden bis Bremen auf dem Vergabewege neu erstellt. Das bestehende 1D-Modell der Donau zwischen Kelheim und Jochenstein ist wegen der Berechnung und Neufestlegung der Wasserspiegellage für den Regulierungsniedrigwasserstand zu aktualisieren. In Zusammenarbeit mit der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt und Elbeanliegerländern entstehen neue FLYS-Datensätze für die Havel zwischen Berlin und der Mündung sowie für die gesamte deutsche Binnenelbe. Freigeschaltet werden die neuen FLYS-Datensätze dieser BWaStr im Jahr 2018 bzw. 2019. Zur Inwertsetzung der Datensätze aus den 2D-Modellen sind softwaretechnische Weiterentwicklungen notwendig (v. a. Kartentool in FLYS). Hierzu notwendige Schritte bzw. Entwicklungsprozesse müssen zeitnah initiiert und realisiert werden (s. Pkt. 5).
- (2) FLYS greift momentan auf mehrere interne Datenbanken zu, in denen historische Abflusstafeln für Pegel an BWaStr, Haupt- und Extremwerte W und Q und gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen gespeichert sind. Diese Daten sind Eigentum der WSV und werden somit in der BfG redundant vorgehalten. Gewässerkundlichen Gremien der WSV wurde schon mehrmals seitens der Verantwortlichen des Fachdienstes versichert, diese doppelte Datenhaltung zu beenden. Insbesondere der unmittelbare Zugriff auf die amtlichen Angaben zu Haupt- und Extremwerten erscheint dringend notwendig, um Ungewissheiten in der FLYS-Nutzergemeinschaft bzgl. der Aktualität der Angaben in FLYS zu zerstreuen. Mit der Migration von Pegeldaten nach WISKI 7 scheint eine günstige Gelegenheit zu bestehen, durch Anbinden von WSV-Datenbanken, die die datenführenden Quellen darstellen, die Redundanz zu beenden. Hier ist ein abgestimmtes Vorgehen mit der WSV erforderlich.

- (3) Softwareentwickler der FLYS-Versionen ab der dritten Entwicklungsphase (Version FLYS 2.0.4) haben darauf hingewiesen, dass beispielsweise in der für den Fachdienst grundlegenden Software „Dive4Elements River“, die als Freie Software veröffentlicht wird (<http://dive4elements.org/>), eine größere Anzahl von Programmbibliotheken in den derzeit verwendeten Versionen nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen und im Falle einer nicht erfolgreichen Aktualisierung die Lauffähigkeit der Software gefährden. Es sollte in der laufenden sechsten Entwicklungsphase alles unternommen werden, so dass die Zukunftsfähigkeit der FLYS-Software für die nächsten Jahre gesichert ist.
- (4) Während der fünften Entwicklungsphase (Web-FLYS) wurden zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten erkannt. In allen derzeitigen Modulen verhindern die Workflows teils erheblich ein professionelles Arbeiten, enthält der Datenkorb mitunter nicht korrekt konfigurierte Filterfunktionen bzw. sind die Themenstileditoren nicht immer voll funktionsfähig. Diese Mängel müssen u. a. behoben werden.
- (5) Mehrere Anforderungen von Nutzern innerhalb und außerhalb der BfG beziehen sich auf neue Berechnungsarten, in denen vorliegende 2D-Modellergebnisse für BWaStr der Nachnutzung in FLYS zugeführt werden. Gewünscht werden Routinen zur Visualisierung und Auswertung von Überschwemmungsflächen, Wassertiefen, Strömungsvektoren.

4 Zusammenfassung und Empfehlungen

Im Juli 2013 wurde der Fachdienst FLYS als Fachanwendung im Geoportal GGInA der BfG eröffnet. Bisher ließen sich 385 Teilnehmer (Stand: 01.04.2018) offiziell als Nutzer registrieren, was als eine hohe Akzeptanz für dieses innovative Angebot der Gewässerkunde gewertet wird. Die Verantwortlichen des Fachdienstes FLYS kennen keinen weiteren Online-Dienst in der hydrologischen Fachwelt, in dem die Idee des benutzerverorteten „virtuellen Pegels“ für beliebige Standorte an Gewässern für umfassende Informations- und Analysezwecke umgesetzt wird. Dies gelingt, da qualitativ hochwertige Ergebnisse aus der hydraulischen Modellierung für BWaStr und weitere Geobasisdaten nachhaltig für diesen Dienst genutzt werden. Der Wasserstand und seine Dynamik sind u. a. wichtige lebensraumbestimmende abiotische Größen, die die Ökologie in/an Gewässern beeinflussen. ÖkologInnen in und außerhalb der BfG bestätigen, dass sie, wie nirgendwo sonst an Gewässern, mit den von FLYS für BWaStr bereitgestellten, ökologisch relevanten Informationen nahezu optimal bedient werden. Es überrascht nicht, dass FLYS-Power-User hauptsächlich in der Ökologie zu finden sind.

Als Beleg für das gewachsene Vertrauensverhältnis zwischen dem Anbieter und Nutzern des Fachdienstes FLYS kann die Bestellliste für neue FLYS-Datensätze angesehen werden. Gegenwärtig werden diese in der Beauftragung von WSV-Dienststellen für den staugeregelten Oberrhein, für die Weser und für die BWaStr Donau aufgebaut. In Zusammenarbeit mit den Elbeanliegerländern entsteht ein neues FLYS für die Havel und die deutsche Binnenelbe.

Software ist bekanntlich niemals zu Ende entwickelt. Um den Anforderungen von Nutzern gerecht zu werden, muss sie ständig konsolidiert und gemäß Stand der Technik weiterentwickelt werden. Mithilfe von Ressortforschungsmitteln des Bundes wird gegenwärtig die FLYS-Software in Verantwortung der Gewässermorphologie zur Behebung erkannter Mängel in Teilbereichen konsolidiert und um zwei neue Module mit Schifffahrts- und

Umweltaspekten (S-INFO, U-INFO) erweitert. Besonders wichtig ist es, im Rahmen der Verbesserung der Software bestehende doppelte Datenhaltungen abzulösen, indem externe Datenbanken der WSV angebunden werden und somit in Zukunft die Pflege dieser Daten ausschließlich von den Dateneigentümern erfolgt. Wie Menschen altern, so altert im besonderen Maße auch Software. Dieser Alterung entgegenzuwirken, ist eine dringende Aufgabe, damit die Zukunftsfähigkeit von FLYS gesichert wird. Ein ständig wachsender Nutzerkreis des Fachdienstes FLYS erwartet, dass in zukünftigen Versionen Ergebnisse aus 2D-hydraulischen Modellierungen an BWaStr bereitgestellt sowie neue Auswerteroutinen entwickelt werden.

Aufgrund der Akzeptanz und Bedeutung des Fachdienstes FLYS in- und außerhalb der BfG ist die bisher im Rahmen der Entwicklung und des Betriebs des Fachdienstes praktizierte Vorgehensweise nach dem Prinzip „Bottom Up“ nicht mehr ausreichend. Wichtige fachliche, strukturelle und organisatorische Entscheidungen, z. B. Fragen der Zugangsberichtigung zur Teilnahme am Fachdienst FLYS, können nicht mehr vom Entwicklerteam allein getroffen und verantwortet werden. Sie bedürfen in Abstimmung mit allen Partnern des Fachdienstes (WSV, Länder, etc.) einer Zustimmung der Leitung der BfG. Das bisherige Vorgehen nach dem bewährten Prinzip „Bottom Up“ benötigt, um die Nachhaltigkeit des Fachdienstes FLYS sicherzustellen, in Zukunft „Rückendeckung von oben“ nach dem Prinzip „Top Down“.

Wie kaum ein anderes in der BfG erstelltes IT-Instrument übernimmt der neue Fachdienst FLYS schon heute Querschnittsaufgaben zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen der Gewässerkunde. Dieser neuartige Service ist somit ein essentieller Bestandteil im Wissenstransfer und der Vernetzung innerhalb der BfG. Abbildung 4 beinhaltet einen Vorschlag des FLYS-Teams, wie in Zukunft der Fachdienst FLYS abteilungsübergreifend strukturiert werden könnte. Wichtig erscheint, dass die BfG sich positioniert und definiert, ob und welche Rolle dieser Fachdienst in Zukunft in den Aufgabenwahrnehmungen spielen soll. Auch das Thema Ressourcen sollte kein Tabu sein. Dieser Vorschlag möchte zu einer Diskussion über die Zukunft des Fachdienstes anregen.

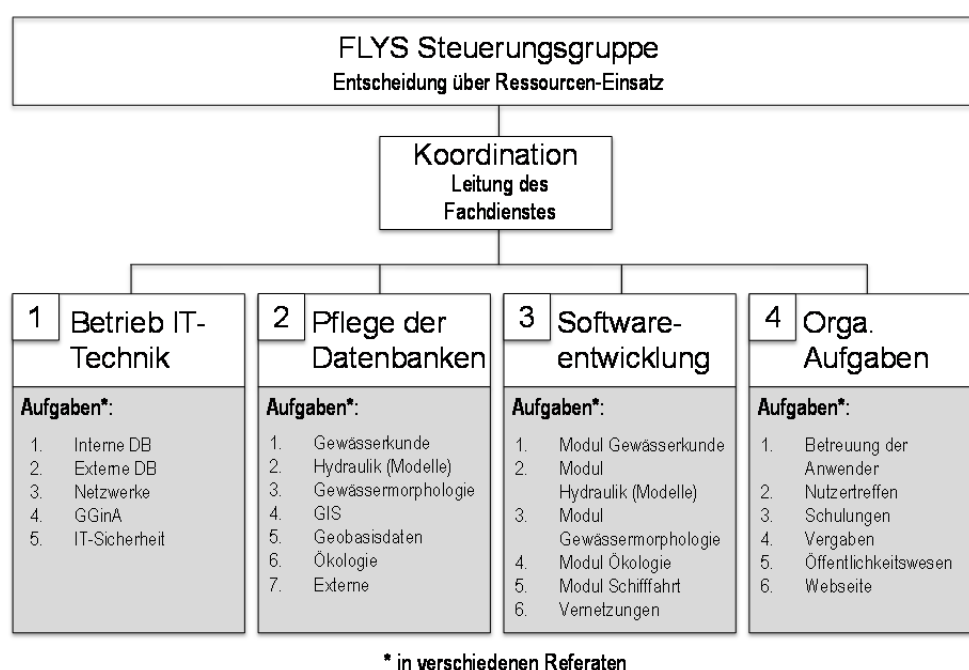


Abb. 4: Vorschlag für die zukünftige Strukturierung des Fachdienstes FLYS in der BfG

Der Bedeutung des Fachdienstes FLYS innerhalb und außerhalb der BfG entsprechend erscheint es zweckmäßig, dass eine Steuerungsgruppe installiert wird, die richtungsweisende Entscheidungen über den Ressourceneinsatz trifft. Die Leitung des Fachdienstes koordiniert alle Arbeiten. Der Fachdienst FLYS besteht zudem aus vier nachgeordneten Teildiensten, die gleichermaßen wichtig und Garant für einen dauerhaften Gesamterfolg sind. Sicherzustellen ist der operationelle Fachbetrieb und die IT-Technik, bestehende/neue Datenbanken müssen gepflegt und aufgebaut werden, die Softwarepflege und -entwicklung müssen nachhaltig sein und organisatorische Aufgaben sind zu übernehmen. Abbildung 4 differenziert die Aufgaben, die in diesen Teildiensten von verschiedenen, zuständigen Referaten übernommen werden sollten.

Abschließend wird empfohlen, ein schlüssiges Konzept zum FLYS-Betrieb, den Daten und der Software zusammen mit der WSV zu entwickeln. Aus Sicht des Fachdiensteanbieters sollten die Softwarepflege und Weiterentwicklung sich vornehmlich an den Nutzeranforderungen orientieren. Institutionelle, IT-technische und organisatorische Anforderungen sind ebenfalls zu berücksichtigen. Die Bereitstellung von Forschungsmitteln des Bundes ist zu begrüßen. Sie könnten flankierend eingesetzt dem Fachdienst temporär nützen. Allein auf dieser Basis lässt sich jedoch kein Konzept eines Online-Dienstes aufbauen und realisieren. Aufgrund von langjährigen Erfahrungen aus den bisherigen Entwicklungsphasen ist es zielführend, sich die dringend benötigte Unterstützung durch längerfristige Rahmenverträge mit Dienstleistern zu beschaffen, damit die hydraulischen Modelle für BWaStr, relevante FLYS-Datensätze und die zugrundeliegende Software nachhaltig und bedarfsorientiert gepflegt und weiterentwickelt werden.

Danksagung

Der Autor dieses Beitrags hat als Projektleiter in den bisherigen fünf Entstehungsphasen zwischen 1998 und 2013 durch wichtige Richtungsvorgaben die Erstellung der Software FLYS bzw. des Fachdienstes FLYS mitgestalten können. Er scheidet im Herbst 2018 aus dem aktiven Dienst in der BfG aus. Durch die kreative und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit vielen KollegInnen in der BfG, in der WSV, bei den Softwareherstellern sowie bei deutschen Ländern entstand ein vielbeachtetes Produkt: Es wurde für den gewässerkundlichen Einsatz an BWaStr geschaffen, aber auch mit dem Blick auf den Nutzerspaß. Mein besonderer Dank gilt Steffi Ackermann, Gernot Belger, Eleonore Bernarding, Jiri Cemus, Udo Chojetzki, Heinz Engel, Doreen Faltis, Matthias Hammer, Marcus Hatz, Dennis Meißner, Winfried Rost, Dr. Michael Schleuter, Sascha Teichmann, Wilfried Wiechmann.

Literatur

- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2008): Erlass vom 23.01.2008, Az.: WS13/WS14 14/02.50/10 (unveröff.)
- BUSCH, N. (2013): Die Flusshydrologische Software FLYS – von den Anfängen bis hin zum webbasierten Fachdienst. In: Veranstaltungen 4/2013 „FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 18-31

- BUSCH, N. (2017): Auswertung von Wasserspiegelfixierungen in der Rheinstrecke zwischen Mainz und St. Goar auf zeitliche Wasserspiegellagenänderungen nach 1950. BfG, Kurzbericht, unveröff.
- BUSCH, N. (2018): Hydraulische Fließgewässermodellierung für Bundeswasserstraßen. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 27-41
- BUSCH, N., S. VOLLMER, M. HATZ (2013): Neue Auswertemethode zum Nachweis von Wasserstandsänderungen im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung an Bundeswasserstraßen – dargestellt am Beispiel der Mittleren Elbe. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 57. Jahrgang, Heft 1, S. 4-13
- GRÄTZ, D., S. VOLLMER, M. HATZ, N. BUSCH (2015): Der Flusshydrologische Fachdienst FLYS der BfG – interdisziplinäres Datenmanagement der Gewässerkunde im Web. 38. Dresdner Wasserbaukolloquium 2015 „Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer“
- HATZ, M., S. TEICHMANN (2013): Die neuen Errungenschaften der Webanwendung für den hydrologischen Fachdienst der BfG: In: Veranstaltungen 4/2013 „FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 39-47
- SCHLEUTER, M. (2010): Berechnung der Degradation von Auen mit Hilfe einer Wasserspiegeldifferenzenkurve. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 54. Jahrgang, Heft 6, S. 360-367
- STÜRMER, W., S. ACKERMANN (2013): Der „intelligente“ Datenkorb – ein integrales Spezialwerkzeug von FLYS. In: Veranstaltungen 4/2013 „FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 68-74



Kontakt:

Norbert Busch

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5227
E-Mail: busch@bafg.de

Jahrgang: 1954

1974 – 1980

Studium der Meteorologie an der Rheinischen-
Wilhelms-Universität Bonn

1984 – 1986

Weiterbildungsstudium Hydrologie-Wasserwirtschaft
des DVWK und Universität Hannover

seit 1981

Wissenschaftlicher Angestellter der Bundesanstalt für
Gewässerkunde in Koblenz

seit 1990: Leiter bzw. Ansprechperson des Aufga-
bengebiets „Fließgewässermodellierung“
in den Referaten M1 und M2

seit 1997: Projektleiter zahlreicher SOBEK-
Modellierungen an Bundeswasserstraßen

seit 2012: Projektleiter zahlreicher 2D-Modellierungen
an BWaStr

1998 – 2013: Projektleiter zur Entwicklung der Software
bzw. des Fachdienstes FLYS der BfG

seit 2013: Leiter des Fachdienstes FLYS

Die Bedeutung überregionaler Wirkungsnachweise im Nationalen Hochwasserschutzprogramm (NHWSP)

Cindy Mathan

1 Einleitung

Als Folge des großen Hochwassers im Mai/Juni 2013 wurde auf der Sonderumweltministerkonferenz (Sonder-UMK) am 2. September 2013 in Berlin die Erarbeitung eines **Nationalen Hochwasserschutzprogramms** beschlossen. Ziel des Programms ist es, den steigenden Risiken von Hochwasserereignissen gut koordiniert und länderübergreifend mit einer erstmaligen bundesweiten Aufstellung von prioritären, überregional wirksamen Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes zu begegnen. Das Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) soll dabei folgende Punkte umfassen:

- > eine flussgebietsbezogene Überprüfung und eventuelle Weiterentwicklung der Bemessungsgrundlagen sowie gemeinsame Ansätze zur Wirkungsabschätzung potenzieller Maßnahmen;
- > die auf einem Programm basierende Liste prioritärer und insbesondere überregionaler Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes, insbesondere zur Gewinnung von Rückhalteräumen mit signifikanter Wirkung auf die Hochwasserscheitel, und zur Beseitigung von Schwachstellen bei vorhandenen Hochwasserschutzmaßnahmen, einschließlich an Bundeswasserstraßen;
- > eine gemeinsame Finanzierungsstrategie.

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat in Zusammenarbeit mit den Flussgebietsgemeinschaften und unter Beteiligung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Naturschutz, Landschaftspflege und Erholung (LANA) Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes erarbeitet. Die Maßnahmen wurden in die Kategorien:

- > Deichrückverlegung/Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen,
- > gesteuerte Hochwasserrückhaltung und
- > Beseitigung von Schwachstellen unterteilt.

Zur Identifizierung von Maßnahmen für das NHWSP gelten die Kriterien Wirksamkeit (Fläche wiedergewonnenen Rückhaltes/Retentionsvolumens, bevorteilte Einwohner, bevorteilte Fläche, bevorteilte Wohn- und Gewerbeflächen) und Synergien (Gewässerentwicklung/Wasserrahmenrichtlinie, Auswirkungen auf den Auenzustand und Stabilität gegenüber Klimaveränderung) sowie das Zusatzkriterium Umsetzbarkeit, die entsprechend der Maßnahmenkategorien untersetzt sind.

Um ein bundesweit vergleichbares Ergebnis zu erreichen, wurden darüber hinaus sogenannte „Abschneidekriterien“ für die Maßnahmenkategorien benannt: Deichrückverlegungen (ggf. auch im Verbund mehrerer Einzelvorhaben) müssen eine Mindestfläche von 100 ha, gesteuerte Flutpolder (ggf. auch im Verbund mehrerer Einzelvorhaben) ein Mindestrückhaltevolumen von 5 Mio. m³ und gesteuerte Hochwasserrückhaltebecken von mindestens 2 Mio. m³ aufweisen (LAWA 2014).

Unter Anwendung dieser in der LAWA vereinbarten Kriterien und Bewertungsmaßstäbe wurden von den Ländern prioritäre und überregional wirksame Maßnahmen flussgebietsweise identifiziert. In Abb. 1 sind als Beispiel die gemeldeten Maßnahmen im Elbeeinzugsgebiet dargestellt.

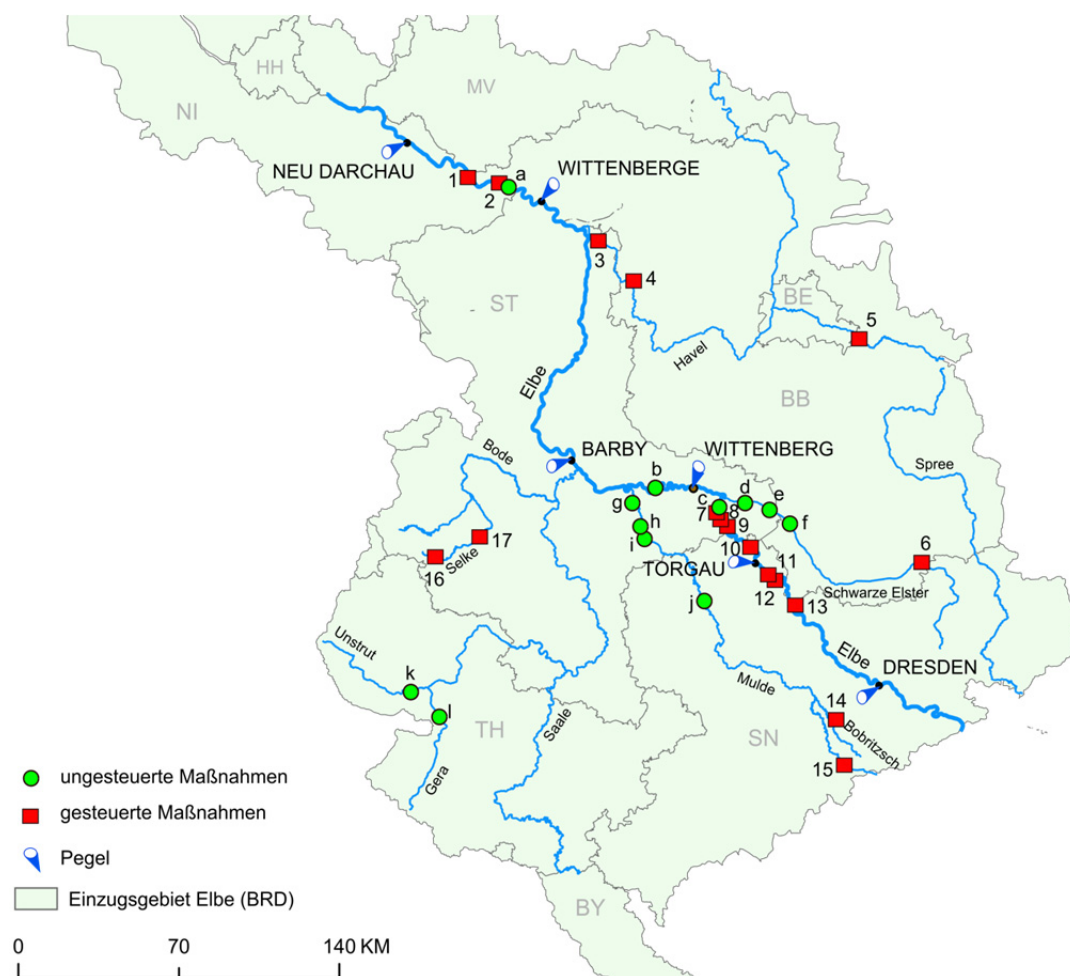


Abb. 1: Darstellung der Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms im Flusseinzugsgebiet Elbe (Quelle: BfG-Bericht-1833, Stand 2014 (PROMNY et al. 2014))

Das „Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) – Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen und Liste der prioritären Maßnahmen zur Verbesserung des Präventiven Hochwasserschutzes“ wurde bei der 83. Umweltministerkonferenz (UMK) am 24. Oktober 2014 in Heidelberg beschlossen. Das Programm soll jährlich fortgeschrieben sowie die Priorisierung der Maßnahmen durch die LAWA und Vertreter des Bundes u. a. entsprechend den Kriterien Realisierbarkeit, Effizienz und Wirkung für den Naturraum jährlich festgelegt werden.

Das NHWSP umfasst ein Kostenvolumen für die kommenden 20 Jahre von rund 5,5 Mrd. Euro. Inzwischen sind über 30 überregional wirkende Projekte zur Deichrückverlegung und über 60 Projekte zur gesteuerten Hochwasserrückhaltung – überwiegend Flutpolder – sowie 16 Projekte zur Beseitigung von Schwachstellen enthalten. Insgesamt sind dies mehr als 220 Einzel- und Teilmaßnahmen. Im Verlauf des Planungs- und Umsetzungsprozesses erfolgt eine konkrete Ausgestaltung der Maßnahmen. Nach derzeitigem Stand werden durch die Umsetzung des NHWSP renaturierte Auen mit einer Fläche von mehr als 20.000 ha sowie mehr als 1.200 Mio. m³ zusätzliches Rückhaltevolumen durch steuerbare Polder geschaffen. Die Maßnahmenumsetzung sieht einen Zeithorizont bis nach 2027 vor. Bereits 2015 wurde mit der Umsetzung erster Maßnahmen begonnen. Der Bund unterstützt die Länder bei der Umsetzung des NHWSP. Dazu wurde der Sonderrahmenplan „Präventiver Hochwasserschutz“ im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz zur finanziellen Förderung eingerichtet und seit 2015 mit Bundesmitteln (bisher in der Regel in Höhe von 100 Mio. Euro jährlich) ausgestattet. In der aktuellen Koalitionsvereinbarung ist die weitere Umsetzung des NHWSP und dauerhafte Ausstattung enthalten.

2 Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Analyse der Wirkung der Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“

Das Bundesumweltministerium (BMU) hat im Rahmen eines Ad-hoc-Vorhabens (August 2014) eine erste grobe Abschätzung der geforderten überregionalen Wirkungen der von den Bundesländern gemeldeten Maßnahmen des NHWSP durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) durchführen lassen. Diese erste Plausibilisierung der Maßnahmen sollte die gemeinsame Sprechfähigkeit von Bund und Ländern anlässlich der 83. UMK unterstützen. Dabei beschränkte sich der erste Teil des Ad-hoc-Vorhabens auf Abschätzungen der theoretisch maximalen Wirkungen aller gemeldeten gesteuerten Hochwasserrückhaltungsmaßnahmen mittels Bilanzbetrachtungen (ohne Verwendung hydrodynamischer Modelle). Diese stellen die oberen Grenzwerte für die tatsächlich erzielbaren Wirkungen dar. Im zweiten Teil wurden für wenige repräsentative Pegelstellen der Flussgebiete modellgestützte Abschätzungen von realitätsnäheren Wirkungen für gesteuerte Rückhaltungen mithilfe exemplarisch ausgewählter historischer Hochwasserereignisse vorgenommen. Für die Aktivierung der gesteuerten Rückhaltungsmaßnahmen wurden dabei drei relativ niedrige Schwellwerte untersucht (HQ₂, HQ₂₀ und HQ₅₀), um passend zu den angesetzten historischen Hochwassern (viele davon erheblich unter HQ₁₀₀) unterschiedliche großräumige Effekte aufzuzeigen. Dies führt zu einem verhältnismäßig frühzeitigen Einstau, wie er im tatsächlich vorgesehenen Einsatz der Maßnahmen i. d. R. nicht eintreten würde. Die darüber hinaus die Praxis vor allem interessierende Wirksamkeit der Maßnahmen bei einem Bemessungshochwasser unter realistischen Bedingungen, d. h. mit oft wesentlich späterer Öffnung der Steuerungsorgane zur Polderflutung, wurde nicht ermittelt. Die Ergebnisse sind im BfG-Bericht-1833 „Ad-hoc-Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“ (PROMNY et al. 2016) enthalten.

2.1 Ziele und Aufgaben des Vorhabens

Das Ad-hoc-Vorhaben diente zugleich als Vorstudie für das vom Umweltbundesamt beauftragte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE) „Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von präventiven Hochwasserschutzmaßnahmen im Rahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“ (Kurztitel: Analyse der Wirkungen von Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms) an die BfG im Jahr 2015 mit einer Laufzeit von vier Jahren. Ziel des Vorhabens ist es, die von den Ländern gemeldeten und in der UMK beschlossenen Liste enthaltenden Maßnahmen flussgebietsweise im Hinblick auf ihre Wirksamkeit einzeln und im Verbund zu plausibilisieren. Damit sollen entsprechend des Sonder-UMK-Beschlusses gemeinsame Ansätze zur Wirkungsabschätzung der Maßnahmen bundesweit erarbeitet werden, und somit eine Grundlage für eine mögliche Priorisierung der Maßnahmen im Zeitverlauf geschaffen werden. Darüber hinaus soll der Bund befähigt werden, eigene Vorstellungen bzgl. möglicher überregionaler Hochwasserschutzmaßnahmen zu entwickeln und ggf. im Rahmen der jährlichen Fortschreibung des Programms in den Prozess einzuspeisen. Damit ist das Projekt geeignet, wesentliche Informationen für einen effizienten Hochwasserschutz und zielgenauen Mitteleinsatz zu liefern und somit den Bund wesentlich bei der Koordinierungsfunktion im Rahmen der Umsetzung des NHWSP zu unterstützen und zu stärken.

Zunächst war in einem ersten Schritt herauszuarbeiten und zusammenzustellen, welche Datengrundlagen und Modellierungen für die Ermittlung der Maßnahmenwirkungen in den einzelnen Flusseinzugsgebieten vorhanden sind, und wo es notwendig ist, Lücken im Bereich der Datengrundlagen bzw. der hydraulischen 1D- bzw. 2D-Modellierung zu schließen. Dabei sollte, soweit möglich und fachlich sinnvoll, auf vorhandene Daten und Untersuchungen der Bundesländer/Flussgebietsgemeinschaften und anderer Forschungsinstitute zurückgegriffen werden. Außerdem waren die eigenen Modelle der BfG sowie Daten und Ergebnisse aus dem Ad-hoc-Vorhaben mit zu berücksichtigen. In einem nächsten Schritt waren auf dieser Basis zunächst für die Flusseinzugsgebiete Elbe, Donau und Rhein hydraulische Modellsysteme als Nachweisinstrumente aufzubauen. Neben dem Hauptstrom waren dabei insbesondere auch die Nebenflüsse mit einzubinden, an denen Maßnahmen im Rahmen des NHWSP geplant sind. Dieser Untersuchungsansatz soll auf andere Flusseinzugsgebiete übertragbar sein und später zunächst an Oder und Weser weiter fortgeschrieben werden, wo derzeit bereits Maßnahmen im NHWSP gemeldet sind. Mithilfe der erarbeiteten Nachweisinstrumente erfolgt anhand modellgestützter Wirkungsnachweise dann die Ermittlung der realistisch zu erwartenden Wirkungen der Maßnahmen des NHWSP für unterschiedliche Hochwasserszenarien in den Flusseinzugsgebieten. Dabei ist zwischen der Wirkung einzelner Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen (sowohl innerhalb als auch zwischen den Maßnahmenkategorien) sowie der Einordnung der Maßnahmen untereinander unter Berücksichtigung der Zeithorizonte ihrer Umsetzung (Ranking) zu differenzieren. In einem weiteren Schritt sind Empfehlungen für mögliche Weiterentwicklungen des NHWSP zu erarbeiten. Durch die Einrichtung eines Projektbeirates ist die enge fachliche Abstimmung mit den Bundesländern, Flussgebietsgemeinschaften und weiterer Fachexperten abgesichert.

2.2 Einsatz hydraulischer Modelle als Nachweisinstrumente

Das Ausmaß der überregionalen Wirkungen von Maßnahmen (hydraulisch-hydrologisch bspw. im Sinne von Scheitelreduktionen bei Hochwasser) hängt im komplexen Wirkungsgefüge zwischen Hochwassergenese und Hochwasserbeeinflussung von vielen Faktoren ab, die mit Hilfe großräumiger mathematischer Modelle im Rahmen umfassender und gewässerübergreifender Nachweisrechnungen für die betroffenen Flussgebiete analysiert werden können. Mit solchen Modellen können bspw. Auswirkungen von historischen Veränderungen an Gewässern (u. a. Laufverkürzungen, Eindeichungen, Stauregelungen) auf Hochwasser aber auch Effekte von Rückhaltemaßnahmen (u. a. Deichrückverlegungen, Flutpolder, Talsperren) in ihren großräumigen hydrologischen Zusammenhängen (Nah- und Fernwirkung) besser verstanden und quantifiziert werden. Hydrodynamisch-numerische Modelle sind auf der Bearbeitungsskala der FuE-NHWSP den hydrologischen Modellen vorzuziehen, da sie nicht nur für einzelne (Pegel-)Standorte, sondern auch strecken-/längsschnittbezogen Aussagen zu den Wirkungen von Maßnahmen geben können und bspw. die Ergebnisse somit wesentlich besser in Beziehung zum existierenden Schutzniveau gesetzt werden können.

Rückhaltemaßnahmen werden von den Ländern im Rahmen des NHWSP nicht nur an den Hauptgewässern Elbe, Rhein, Donau, sondern auch an deren Nebengewässern geplant. Deshalb sind in den Flussgebieten entsprechende Nachweisrechnungen für Haupt- und Nebengewässer erforderlich. Da die BfG ihre Modelle in der Regel für den Bereich der Bundeswasserstraßen erstellt und betreibt, Maßnahmen des NHWSP aber nicht nur an diesen, sondern auch im Einzugsgebiet an Landesgewässern liegen, werden zum Nachweis der überregionalen Wirksamkeit derzeit gemeinsame Modellierungen von Bundesländern und Bund (BfG) durchgeführt. Das bedeutet, dass die BfG an den in ihren Modellen implementierten Modellknoten für die Einmündung von nicht modellierten Gewässerstrecken (überwiegend Landesgewässerstrecken) auf die Zulieferung von mit geeigneten Ländermodellen und sonstigen Verfahren berechneten Daten angewiesen ist.

Um für die im Rahmen des FuE-Vorhabens bearbeiteten Flussgebiete Elbe, Donau und Rhein gleichwertige Nachweisinstrumente zu verwenden und somit vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, müssen gemeinsame Standards und Schnittstellen für die genutzten Modelle und für die Zusammenarbeit zwischen Bund und Ländern definiert und beachtet werden. Weiterhin soll eine Übertragbarkeit der Herangehensweise auf andere Flussgebiete gewährleistet werden. Allen erarbeiteten Bund-Länder-Nachweisinstrumenten ist gemeinsam, dass die Berechnungen an den Hauptgewässern im Wesentlichen mithilfe von eindimensionalen, hydraulischen SOBEK-Modellen der BfG durchgeführt werden (Ausnahme: Oberrhein bis Worms). Für die Nebengewässer von Rhein, Elbe und Donau ergibt sich in Abhängigkeit vom Status der Nebengewässer (Bundeswasserstraßen/Landesgewässer), von der Verfügbarkeit hydraulischer/hydrologischer Modelle sowie vom Maßnahmentyp und dessen aktuellen Planungsstand ein heterogeneres Bild (wie 1D-, 2D- und hydrologische Modelle). Weiterhin wurde eine Vorgehensweise zur Durchführung der Nachweisrechnungen mittels historischer Hochwasser und Modellhochwasser zwischen Bund und Ländern abgestimmt. Eine Methodik zur Auswahl und Generierung von Modellhochwassern sowie fünf bis sechs historisch abgelauften Hochwasser je Flussgebiet wurden als Eingangsgröße für die Nachweisrechnungen festgelegt. Der Bezugzustand für die Modellierungen wurde definiert. Außerdem wurde sich auf die zu modellierenden Maßnahmenkombinationen für die möglichen Modellierungsszenarien je Planungszeitraum verständigt (Weitere Informationen zur detaillierten Durchführung der Nachweisrechnungen in den Flussgebieten siehe SCHUH & SCHMID 2018).

2.3 Stand der Umsetzung und Ausblick

Im Rahmen der durchgeführten Flussgebietsgespräche im Rhein-, Elbe- und Donaugebiet konnten wesentliche Bausteine der Bund-Länder-Modelle in den Flussgebieten festgelegt werden. Hierdurch wurde Klarheit geschaffen, für welche Gewässerstrecken und Maßnahmen welche BfG- und Ländermodelle zum Einsatz kommen. Es erfolgten Arbeiten zur Vorbereitung und Durchführung der Datenbeschaffung für die in den hydraulischen Modellen zu berücksichtigenden Maßnahmen und zur Aktualisierung der BfG-eigenen hydraulischen SOBEK-Modelle (Donau, Niederrhein, Elbe). Für die modellbasierten Nachweisrechnungen wurden als wichtige Grundlagen eine gemeinsame Definition für das Hochwasserszenario „Extremereignis“ und „überregionale Wirksamkeit“ zusammen mit Vertretern der Länder diskutiert (siehe auch SCHUH & SCHMID 2018). Bei der „überregionalen Wirksamkeit“ soll der Fokus im FuE-NHWSP auf hydraulisch-hydrologisch abgeleiteten Kriterien liegen, die anhand von Modellrechnungen validiert werden. Nach Fertigstellung der Bund-Länder-Modellsysteme für die jeweiligen Flussgebiete wird mit den Nachweisrechnungen der Maßnahmenwirkungen begonnen. Ergebnisse werden Anfang 2019 vorliegen.

3 Fazit

Mit der Erarbeitung des Nationalen Hochwasserschutzprogramms wurde die Forderung, „den Flüssen mehr Raum zu geben“, operationalisiert. Das NHWSP dient der Gewinnung von gesteuerten (Flutpoldern, Hochwasserrückhaltebecken) und ungesteuerten Rückhalteräumen (Deichrückverlegungen) mit überregionaler Wirksamkeit. Damit gibt es zum ersten Mal eine bundesweite Aufstellung mit vordringlichen Maßnahmen des Hochwasserschutzes. Mit der flussgebietsweisen Betrachtung überregional wirkender Maßnahmen wird das Solidaritätsprinzips zwischen Anrainern am Ober- und Unterlauf von Gewässern – als ein wesentliches Ziel des NHWSP – gefördert. Die wissenschaftliche Begleitung des NHWSP erfolgt durch das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von präventiven Hochwasserschutzmaßnahmen im Rahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“. Mithilfe großräumiger hydraulischer Abflussmodelle bzw. gekoppelter hydrologisch-hydraulischer Modelle soll die überregionale Wirkung der Maßnahmen auf Hochwasserstände und Wellenablauf nachgewiesen werden. Zunächst erarbeitete der Bund mit den Bundesländern ein gemeinsames Verständnis und gemeinsame Verfahren für die Nachweisberechnungen zu den überregionalen Wirkungen der Maßnahmen im NHWSP. Im Zuge der begleitenden wissenschaftlichen Untersuchungen zum NHWSP sollen nun von allen Beteiligten möglichst Nachweise mit gleichwertigen hohen Standards angestrebt und geführt werden. Dazu wurden in enger Abstimmung mit den Ländern für die Flusseinzugsgebiete Elbe, Donau und Rhein von der BfG gekoppelte hydraulische Bund-Länder-Modelle erarbeitet sowie Anforderungen an den Einsatz von Modellen festgelegt, mit denen nun die Maßnahmenwirkungen ermittelt werden.

Literatur

- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2006): Modellgestützter Nachweis der Auswirkungen von geplanten Rückhaltemaßnahmen in Sachsen und Sachsen-Anhalt auf Hochwasser der Elbe, Bericht BfG-1542
- IKSR - Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2012): Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein. Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser 1995 -2010 einschließlich Vorausschau für 2020 sowie 2020+. Fachbericht 199.
- IKSR - Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2015): Abschätzung der Wahrscheinlichkeitsänderung durch die hochwasserreduzierenden Maßnahmen entlang des Rheins. Fachbericht 229.
- LAWA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2014): Nationales Hochwasserschutzprogramm – Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen sowie ein Vorschlag für die Liste der prioritären Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes
- PROMNY, M., N. BUSCH, T. MAURER (2014/2016): Ad-hoc-Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen des Nationalen Hochwasserschutz-programms. Teilbericht 1: Prüfung der von den Bundesländern gelieferten Unterlagen zu Maßnahmen und erste Abschätzung ihrer Wirkungen auf Hochwasser. Teilbericht 2: Exemplarische Ermittlung realitätsnäherer Wirkungen und Wirkungsgrade der gemeldeten gesteuerten Rückhaltungen an Rhein, Elbe und Donau. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-1833, Koblenz
- SCHUH, C., M. SCHMID (2018): Einsatz von Modellsystemen im Donaugebiet – Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum NHWSP. In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 92-100



Kontakt:

Dipl.-Ing. Cindy Mathan

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

Tel.: 0340/ 2103 2795

E-Mail: cindy.mathan@uba.de

1993 – 2000

Studium Umweltingenieurwesen/Verfahrenstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus

01/2000 Diplom-Ingenieurin

2000 – 2002

Mitarbeiterin in der Oberen Wasserbehörde im Landesumweltamt Brandenburg

2003

Auslandsaufenthalt in Neuseeland

2004 – 2005

Mitarbeiterin im Naturschutzgroßprojekt „Gewässerrandstreifenprojekt Spreewald – Phase 2“

seit 2005

Wissenschaftliche Angestellte des Umweltbundesamtes

2005 – 2013: Fachgebiet Stoffhaushalt Gewässer
Schwerpunkte: Umsetzung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie und der EU-Wasserrahmenrichtlinie (Maßnahmen zur Reduzierung der stofflichen Einträge in die Gewässer)

seit 2013: Fachgebiet Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden
Schwerpunkte: Hochwasser (Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, Nationales Hochwasserschutzprogramm) und Mikroschadstoffe (Spurenstoffstrategie des Bundes)

Einsatz von Modellsystemen im Donaugebiet – Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm (FuE-NHWSP)

Carina Schuh und Martin Schmid

1 Das FuE-Vorhaben zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm

1.1 Hintergrund

Das Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) wurde im Oktober 2014 – im Nachgang zu den verheerenden Hochwassern im Donau- und Elbegebiet ein Jahr zuvor – gemeinsam von Bund und Bundesländern beschlossen. Im Rahmen dieses Programms fördert der Bund Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes, insbesondere zur Gewinnung von gesteuerten und ungesteuerten Rückhalteräumen mit signifikanter überregionaler Wirkung auf Hochwasser. Neben den zu erfüllenden Kriterien „Wirksamkeit“, „Synergien“ und „Umsetzbarkeit“ müssen Flutpolder dabei ein Mindestrückhaltevolumen von 5 Mio. m³ (Hochwasserrückhaltebecken 2 Mio. m³) und Deichrückverlegungen eine Mindestfläche von 100 ha aufweisen (LAWA 2014, Details siehe MATHAN 2018).

Zur fachlichen Begleitung des NHWSP wurde die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) beauftragt, ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (2015-2019) durchzuführen, um die Wirkungen der im NHWSP gemeldeten Maßnahmen flussgebietsweise mithilfe mathematischer Modelle zu untersuchen. Die Analyse befasst sich zunächst nur mit den drei größten deutschen Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein und wird gemeinsam von der BfG und den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer durchgeführt. Das Vorhaben folgt einem bundesweit einheitlichen Untersuchungsansatz, der zwar einzelnen Flussgebietscharakteristika gerecht wird, dabei aber vergleichbar und übertragbar auf andere Flussgebiete bleibt.

Im Donaugebiet arbeiten die BfG und das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) gemeinsam an der Wirkungsanalyse der geplanten NHWSP-Maßnahmen. Derzeit stehen auf Seiten beider Projektpartner die Modellvorbereitungen kurz vor dem Abschluss, so dass in Kürze mit den ersten Modellrechnungen begonnen werden kann.

1.2 Erwartungen an das FuE-Vorhaben

Das FuE-Vorhaben verfolgt in erster Linie das Ziel, die Wirkung der im Flussgebiet geplanten Rückhalteräume auf unterschiedliche Hochwasserabläufe großräumig zu analysieren. Hierzu zählt die Beantwortung einer Vielzahl an Fragen:

- > Wie wirken die geplanten gesteuerten bzw. ungesteuerten Maßnahmen auf den Wellenscheitel und Wellenablauf? Können sie sich womöglich gegenseitig ergänzen?
- > Welche Bedeutung hat die Hochwassergenese für den Einsatz von Flutpoldern und deren Wirkung? Welche Rückschlüsse können bzgl. der Verortung von Maßnahmen an Haupt- und Nebengewässern gezogen werden?
- > Lassen sich durch die Wirkungsanalyse Aussagen zu Lücken im Hochwasserschutz bzw. zu einem möglichen Überangebot an geplanten Maßnahmen in einem Flussabschnitt machen?
- > Inwiefern ist der geplante Hochwasserschutz für seltene Hochwasser ausgelegt?

Die im FuE-Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse sollen schlussendlich in das NHWSP zurückgespiegelt werden. Es wird erwartet, dass die Szenarienberechnungen das Verständnis zu überregionalen Maßnahmenwirkungen verbessern und auf diese Weise dazu beitragen, die bislang angesetzten, vereinfachten Kriterien für die Auswahl und Priorisierung von Maßnahmen im Programm künftig stärker hydraulisch/hydrologisch zu untermauern bzw. zu konkretisieren.

Für die von Bayern im NHWSP gemeldeten Maßnahmen im Donaugebiet liegen je nach Planungsstand bereits Wirkungsanalysen vor. Diese konzentrieren sich aber vorwiegend auf die konkreten Planungen der jeweiligen Maßnahmen und sind vom Umgriff her meist auf die lokale oder regionale Ebene bzw. Teilflussgebiete begrenzt. Übergebietsliche Wirkungsanalysen wurden nur vereinzelt durchgeführt, z. B. an der Donau für die dort geplanten Flutpolder im Rahmen einer Vorstudie der TU München (TUM 2012). Die im FuE-Vorhaben vorgesehenen Wirkungsanalysen ergänzen somit die in Bayern vorliegenden, laufenden bzw. geplanten Untersuchungen, da sie erstmals das Zusammenwirken aller gemeldeten Maßnahmen (gesteuerte und ungesteuerte Rückhalteräume) für das gesamte bayerische Donaugebiet, insbesondere auch das Zusammenwirken der Maßnahmen an Donau und Inn, aufzeigen werden.

1.3 Bundesweiter Untersuchungsansatz

Derzeit sind in den Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein insgesamt 53 gesteuerte und 30 ungesteuerte Rückhaltemaßnahmen im NHWSP gemeldet (Stand: 01/2018). Damit sollen knapp 1 Mrd. m³ gesteuerter Rückhalteraum geschaffen und mehr als 32.000 ha Vorland wiedergewonnen werden. Die Maßnahmen sind vorwiegend entlang von Donau, Elbe und Rhein und deren Nebenflüssen geplant, erstrecken sich aber teilweise auch bis in die oberen Einzugsgebiete dritter oder vierter Ordnung.

Für den modelltechnischen Nachweis der Maßnahmenwirkungen ist daher ein weitreichendes Modellsystem erforderlich, das entsprechend von BfG und Ländern im Rahmen des FuE-Vorhabens für jedes der drei Flussgebiete aufgebaut wurde. Dabei kommen vorrangig hydraulische Modelle (1D, 2D) zum Einsatz, um bestmögliche Aussagen zu Wasserständen und Wellenablauf über den gesamten Flusslauf machen zu können – nicht nur an Pegeln, sondern auch streckenbezogen. Hydrologische Modelle werden nur dann eingesetzt, wenn kein hydraulisches Modell zur Verfügung steht oder um die durch lokale 2D-Modellierung abgeschätzte Maßnahmenwirkung im Nebengewässer über weite Strecken zum nächsten Vorfluter zu „transportieren“. Die verschiedenen Modelle werden teilweise technisch gekoppelt oder aber die simulierten Ganglinien des Zuflussmodells als Randbedingung in das Modell unterstrom übergeben.

Für nahezu alle Bundeswasserstraßen (BWaStr) im Donau-, Elbe- und Rheingebiet verfügt die BfG zur Aufgabenwahrnehmung gegenüber der WSV bereits über hydraulische Modelle. In den meisten Fällen übernimmt sie somit die Modellierung des Hauptgewässers sowie z. T. auch der größeren Nebengewässer erster Ordnung (im Rhein- und Elbegebiet oft auch BWaStr). Die Länder hingegen sind meist für die Modellierung der Maßnahmen entlang der Zuflüsse verantwortlich. Das spiegelt sich in der verwendeten Modelltechnik wider: Die größte Zahl an Maßnahmen (meist entlang des Hauptgewässers) wird mithilfe von 1D-SOBEK-Modellen der BfG modelliert. Dort, wo die BfG keine großräumigen SOBEK-Modelle vorhält, werden i. d. R. 2D- oder hydrologische Modelle der Länder eingesetzt. Dadurch, dass die Modellsysteme zum Großteil auf wenig rechenintensiver 1D-Modellierung beruhen, sind sie an den Hauptgewässern problemlos für eine Vielzahl an zu wiederholenden Modellläufen einsetzbar.

Die Zusammenarbeit zwischen Bund und Ländern beschränkt sich nicht nur auf die zu verwendende Modelltechnik; auch die Modellierungsstrategie, die Modellberechnungen sowie die Ergebnisauswertung werden gemeinsam erarbeitet bzw. durchgeführt. Die Modellierungsstrategie sieht vor, die Wirkungsanalyse sowohl für die Gesamtheit aller Maßnahmen als auch getrennt nach Maßnahmentyp (gesteuerter oder ungesteuerter Rückhalt) und Lage der Maßnahme (an Haupt- oder Nebengewässern) durchzuführen. Unter Einbeziehung verschiedener Umsetzungshorizonte sind insgesamt 7 Maßnahmenkombinationen vorgesehen.

Die Maßnahmen szenarien werden sowohl für jeweils fünf charakteristische Hochwasserereignisse der jüngeren Vergangenheit als auch für zwölf künstlich daraus erzeugte Modellhochwasser untersucht (ca. 120 Modellläufe pro Flussgebiet). Die Modellhochwasser werden generiert, indem drei der historischen Ereignisse an jeweils zwei Pegeln im Hauptgewässer (Zielpiegel) auf je HQ_{100} sowie eine höhere Jährlichkeit zwischen HQ_{200} und HQ_{500} hochskaliert werden. Letzteres entspricht, abhängig vom Flussgebiet, i. d. R. einem Faktor zwischen 1,1 - 1,2 x HQ_{100} . Um die natürliche Hochwassergenese beizubehalten, werden bei der Skalierung die Zuflussrandbedingungen (Ganglinien) oberhalb des jeweiligen Zielpiegels mit einem einheitlichen Faktor belegt, die Zuflüsse unterhalb des Zielpiegels bleiben jedoch unverändert. Ziel der Skalierung ist es, Abflüsse auch deutlich über dem Bemessungsabfluss zu generieren, bei denen das Einsatzkriterium der Flutpolder deutlich überschritten wird (meist HQ_{100} oder höher). Nur so kann eine Analyse der Wirkungen einer zusammenhängenden Flutpolderkette über längere Gewässerstrecken erfolgen. Deichüberströmen oder -versagen soll in den Untersuchungen im FuE-Vorhaben nicht berücksichtigt werden, da es mögliche Maßnahmenwirkungen überprägen würde und somit nicht dem Ziel der Untersuchung dient. Die Modellhochwasser werden daher auf ein Niveau hochskaliert, bei dem man noch davon ausgehen kann, dass zwar großräumige extreme Wasserstände entstehen, diese jedoch die Deichhöhe plus 1 m Freibord i. d. R. nicht übersteigen.

2 Hochwassercharakteristika des Donaubeiets

Nach dem verheerenden Hochwasserereignis im Juni 2013 mit zwei Deichbrüchen an der Donau wurde in Bayern das bewährte Hochwasserschutz-Aktionsprogramm (AP2020) zu einem Aktionsprogramm 2020plus erweitert. Neben einem erhöhten Finanzvolumen und einer schnelleren Umsetzung war damit auch eine fachliche und strategische Neuausrichtung verbunden. Schwerpunkte des AP2020plus sind die verstärkte Auseinandersetzung mit dem

sogenannten Überlastfall, der immer dann eintritt, wenn die Hochwasserabflüsse den Schutzgrad der Hochwasserschutzsysteme überschreiten, sowie ein erweitertes Rückhaltekonzept, das bayernweit sowohl natürliche als auch technische Rückhaltepotenziale in den Fokus stellt. Der strategische Ansatz im NHWSP und die gesetzten Schwerpunkte im AP2020plus gehen somit Hand in Hand.

Im NHWSP hat Bayern für das Flussgebiet Donau beim Maßnahmentyp „Deichrückverlegung/Wiedergewinnung Rückhalteflächen“ fünf Verbundmaßnahmen an Donau, Lech, Isar und Salzach mit insgesamt rd. 3.400 ha gemeldet (Abb. 1). Beim gesteuerten Rückhalt sind es derzeit 17 Maßnahmen mit insgesamt rd. 200 Mio. m³ Rückhalteraum, die sowohl regional für den Grundschutz HQ₁₀₀ wirkende Maßnahmen umfassen (z. B. Maßnahmen an Günz und Mangfall) als auch Maßnahmen, die speziell für den Überlastfall konzipiert sind (z. B. Flutpolder an Donau und Inn).

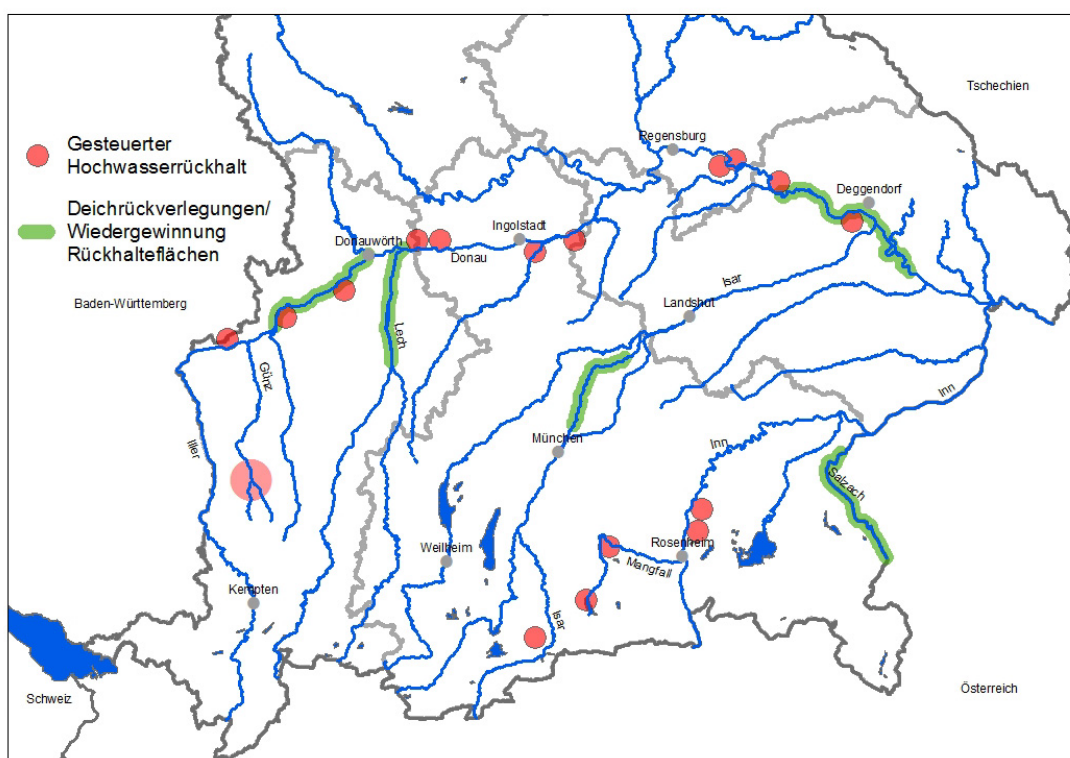


Abb. 1: Von Bayern im NHWSP für das Donauegebiet gemeldete, derzeit in Planung oder Umsetzung befindliche Maßnahmen

Die Besonderheiten des Abflussgeschehens an der Donau selbst führen dazu, dass der im FuE-Vorhaben abgestimmte bundesweite Untersuchungsansatz (Kapitel 1.3) in Teilen auf die speziellen Verhältnisse angepasst werden muss. Das Abflussgeschehen wird durch die vielfältige geographische Gliederung der Teileinzugsgebiete und die unterschiedlichen topographischen, geologischen und hydrometeorologischen Verhältnisse bestimmt. Der Beitrag der Flüsse aus dem alpinen Bereich am Hochwassergeschehen in der Donau ist trotz des kleineren Flächenanteils dominierend, wie auch die Hochwasserlängsschnitte zeigt (Abb. 2). Der Hochwasserabfluss der Donau unterhalb des Inn wird fast ausschließlich durch den Inn geprägt, obwohl das Inneinzugsgebiet nur ein Drittel des Gesamteinzugsgebietes in diesem Bereich ausmacht.

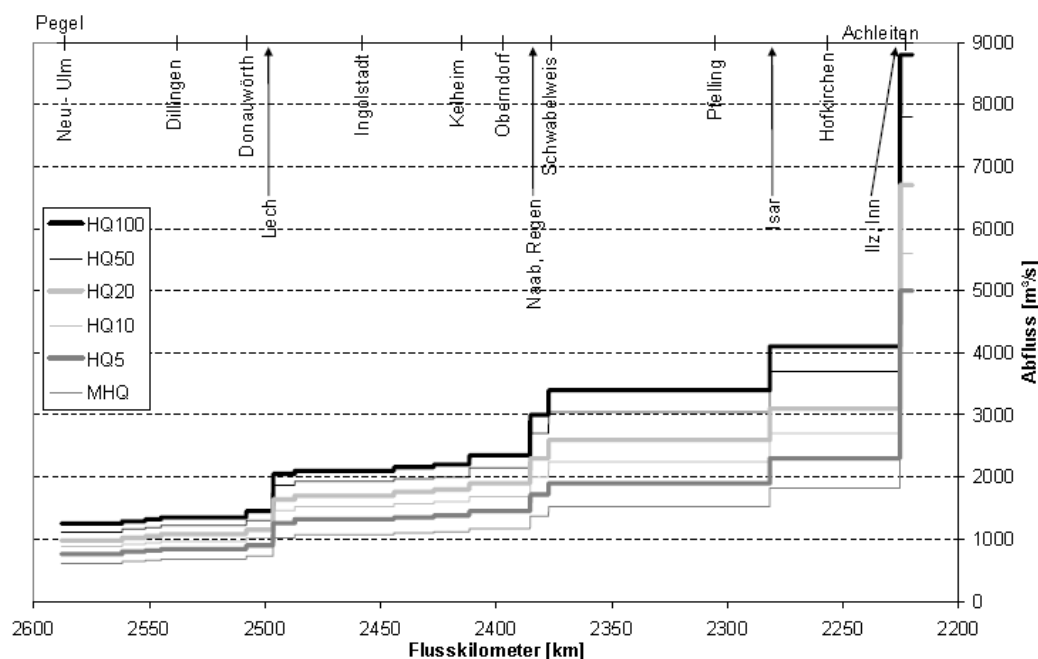


Abb. 2: Hochwasserlängsschnitte der bayerischen Donau

Die jahreszeitlich unterschiedliche Hochwasserführung der nördlichen und südlichen Donauzuflüsse beeinflusst wesentlich den Aufbau der Donauhochwasserwellen. Entsprechend der Aufeinanderfolge der größeren Zuflüsse kann die bayerische Donau in fünf Abschnitte eingeteilt werden (Abb. 2 und Abb. 3a):

- > Iller- bis Lechmündung,
- > Lech- bis Naab-/Regenmündung,
- > Regen- bis Isarmündung,
- > Isar- bis Innmündung,
- > unterhalb Innmündung.

Je nach Lage der Niederschlagsschwerpunkte in den Einzugsgebieten der größeren seitlichen Zuflüsse können die verschiedenen Abschnitte der Donau unterschiedlich stark von Hochwasser betroffen sein (Abb. 3b). Dieser Umstand führt auch dazu, dass in verschiedenen Donauabschnitten Flutpolder vorgesehen sind. Deren Einsatz ist jeweils lokal/regional vorgesehen, wenn der Überlastfall im betreffenden Donauabschnitt droht, aber auch überregional als vorgeschalteter Flutpolder, wenn der Überlastfall erst unterhalb eines größeren Zuflusses auftritt. Das Prinzip des vorgeschalteten Flutpolders verfolgt dabei die Idee, dass ein Flutpolder an der Donau, der auf den Scheitel des hochwasserführenden seitlichen Zuflusses gesteuert wird, eine größere Scheitelkappung in der Donau unterhalb der Einmündung erzielen kann als bei einer Steuerung auf den Donauscheitel im selben Abschnitt (Abb. 3c).

Abweichend vom bundesweiten Untersuchungsansatz (Kapitel 1.3) werden daher im Flussgebiet Donau für die Skalierung der Modellhochwasser jeweils ein Zielpegel an der Donau und einer am Inn ausgewählt. Angesichts der Tatsache, dass viele gemeldete Maßnahmen speziell für den Überlastfall konzipiert sind, sollen zudem beide Skalierungen im Bereich zwischen HQ_{200} und HQ_{500} liegen (d. h. 1,1 und 1,2 x HQ_{100}). Auf eine Skalierung auf HQ_{100} wird im Flussgebiet Donau i. d. R. verzichtet.

3 Modellsystem und Modellierungsstrategie im Donauegebiet

3.1 Modellierung der Donau

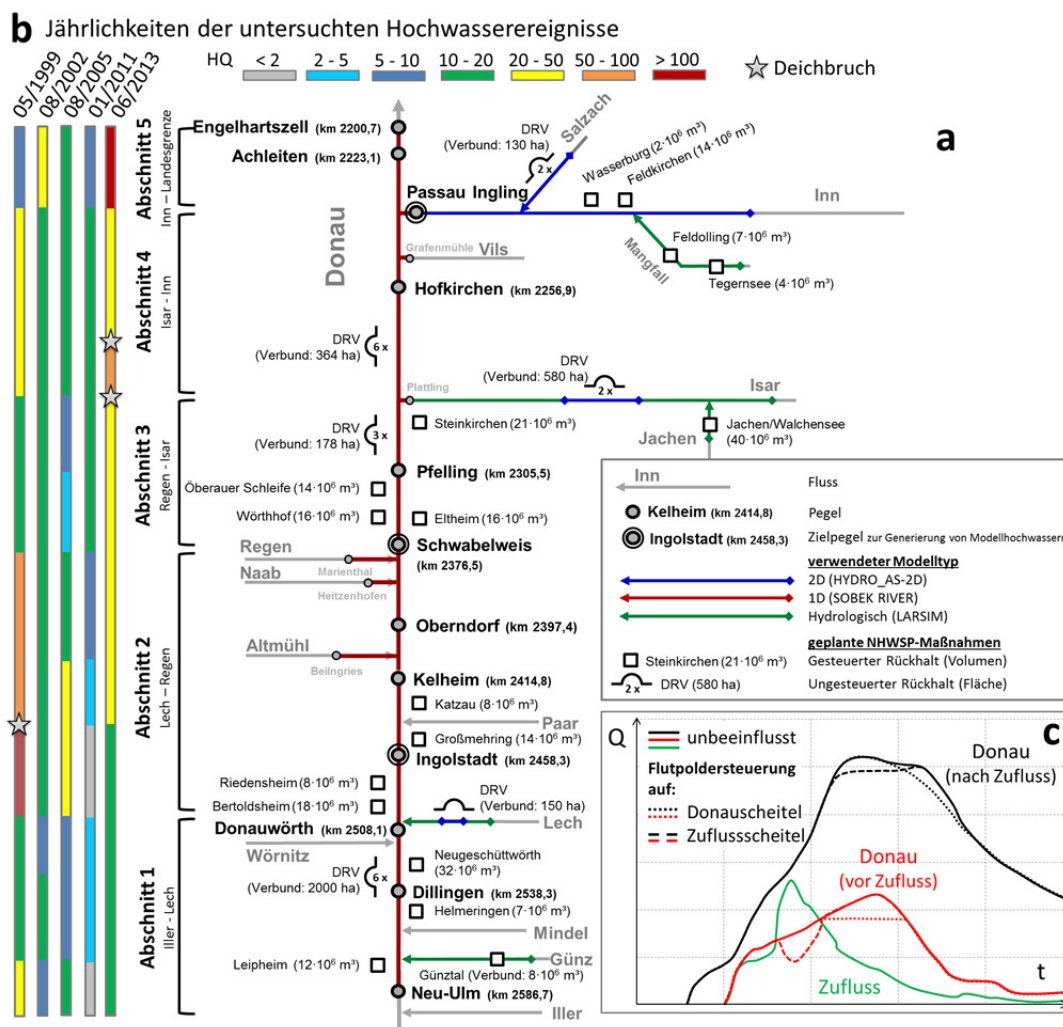
Die Donau, einschließlich der Mündungsbereiche größerer Nebenflüsse, wird von der BfG mit dem SOBEK-Modell von Neu-Ulm bis zur österreichischen Landesgrenze modelliert (386 km; rote Linie in Abb. 3a). Besonders auf der Landesgewässerstrecke bis Kelheim war hierzu eine Modellerweiterung für den Einsatz im Hochwasserfall notwendig. Im aktualisierten SOBEK-Modell (2018) werden nun großräumige Vorlandretention, einschließlich der bei Hochwasser parallel zur Donau verlaufenden Strömungen in der Aue (z. B. der Riedstrom), sowie eine gesonderte Wehrsteuerung im Hochwasserfall abgebildet.

Die für die Wirkungsanalyse ausgewählten fünf historischen Hochwasserereignisse (Abb. 3b) decken eine große Spannweite an charakteristischen Hochwassergenese sowie Jährlichkeiten ab. Zur Generierung von Modellhochwassern an der Donau wurden das Pfingsthochwasser 1999, das Augusthochwasser 2005 und das Junihochwasser 2013 ausgewählt, da sie die bedeutendsten Ereignisse der jüngeren Vergangenheit mit großen verursachten Schäden waren (teilweise mit Deichversagen). Unter Berücksichtigung der jeweiligen Hochwasserentstehung und mit dem Ziel, möglichst großräumige Hochwasser im Bereich HQ₂₀₀ bis HQ₅₀₀ entlang der gesamten bayerischen Donau zu generieren, sollen die Modellhochwasser an den Zielpiegeln Ingolstadt (Ereignisse 1999 und 2005) und Schwabelweis (Ereignis 2013) erzeugt werden. Mit den hochskalierten Hochwassern 1999 und 2005 erhält man voraussichtlich Szenarien, bei denen mehrere der Flutpolder im ersten und zweiten Donauabschnitt eingesetzt würden. Bei dem hochskalierten Hochwasser 2013 mit beachtlichen Abflüssen aus den Nebengewässern ergibt sich sogar ein noch großräumigeres Ereignis, bei dem voraussichtlich alle Flutpolder an der Donau zum Einsatz kämen.

Da für die Flutpolder an der Donau im späteren Einsatzfall eine ereignisbezogen optimierte Betriebsweise vorgesehen ist, können im FuE-Vorhaben modelltechnisch nicht alle Steuervorgaben fest implementiert werden. Der Einsatz und die Steuerung der Flutpolder im Donauegebiet werden daher für jedes betrachtete historische und künstlich erzeugte Hochwasserereignis (gesamt: 17 Ereignisse) individuell festgelegt. Besonders interessant wird die Entscheidung des Flutpoldereinsatzes in den Abschnitten, in denen Flutpolder mit vergleichbaren Einsatzkriterien und Rückhaltevolumen in unmittelbarer Nähe zueinander liegen oder in denen sie direkt in einer Linie hintereinandergeschaltet sind und sich gegenseitig beeinflussen (z. B. Flutpolder Helmeringen und Neugeschüttwörth im Riedstrom). Die genaue Steuerstrategie wird derzeit im Rahmen der Planung zum Flutpolderprogramm Donau erst noch entwickelt. Es ist im Donauegebiet aber generell wichtig zu verstehen, wie sich die Flutpolderwirkung auf die Hochwasserstände der Donau bei Steuerung auf einen Überlastfall im selben oder nachfolgenden Donauabschnitt (als vorgeschalteter Flutpolder) unterscheidet (Abb. 3c).

3.2 Modellierung der Donauzuflüsse

Die Modellierungen der vier Zuflüsse, an denen Maßnahmen im NHWSP gemeldet sind (Günz, Lech, Isar, Inn mit Mangfall und Salzach) werden vom Land Bayern durchgeführt (blaue und grüne Linien in Abb. 3a).



werden die gleichen wie an der Donau sein (Abb. 3b), zur Generierung der skalierten Modellhochwasser werden jedoch die am Inn maßgebenden Ereignisse Auguthochwasser 2002, Auguthochwasser 2005 und Junihochwasser 2013 verwendet. Als Zielpiegel am Inn werden Passau Ingling (Ereignisse 2002 und 2013) und Wasserburg (Ereignis 2005) ausgewählt. Damit wird das Ziel verfolgt, auch im Inngebiet sehr hohe Abflüsse über längere Gewässerstrecken entstehen zu lassen, die einen großräumigen Maßnahmeneinsatz erforderlich machen.

4 Ausblick

Die ersten Berechnungsergebnisse für das Donaugebiet werden Ende 2018 vorliegen; der Projektabschluss einschließlich der Schlussberichterstattung ist für Mitte 2019 vorgesehen. Darüber hinaus, d. h. auch nach Beendigung des FuE-Vorhabens, ist geplant, dass die BfG weiterhin die fachliche Begleitung des NHWSP innehaben und den Bund bei der Koordination und Ausgestaltung des Programms beraten wird.

Die vorgesehene Verstetigung der Beratungsleistung sollte zum Anlass genommen werden, einerseits die im FuE-Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse und andererseits die mit hohem Aufwand aufgebaute Modelltechnik angemessen nachzunutzen. Zunächst sollten die bisher bestehenden Modellsysteme kontinuierlich verbessert werden, sei es in der Modellabdeckung (Modelllücken schließen) oder in der verwendeten Modelltechnik (von hydrologischen hin zu hydraulischen Modellen). Es wird dabei auch möglich sein, neu hinzukommende Maßnahmen (wie bspw. mögliche neue Flutpolderstandorte am Inn) oder Maßnahmen mit aktualisiertem Planungsstand (z. B. die Deichrückverlegungen am Lech) im Rahmen weiterer Variantenuntersuchungen zu berücksichtigen.

Die längerfristige Beratung des NHWSP bietet aber auch die Chance, intensiver auf individuelle, das Flussgebiet betreffende Forschungsfragen einzugehen. Im Donaugebiet könnte sich die aufgebaute Modelltechnik gut eignen, die Steuerstrategie der geplanten Flutpolder(ketten) entlang der Donau gezielter zu analysieren und zu konkretisieren/optimieren. Des Weiteren wäre auch denkbar, das für den Hochwasserfall optimierte SOBEK-Modell der BfG ggf. in die Hochwasservorhersage des Landes Bayern mit einzubeziehen. Auch ein Einsatz der Modelltechnik für die tatsächliche Flutpoldersteuerung im Hochwasserfall entlang der bayerischen Donau könnte geprüft werden.

Literatur

- LAWA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2014): Nationales Hochwasserschutzprogramm: Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen sowie ein Vorschlag für die Liste der prioritären Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes. Ständiger Ausschuss der LAWA „Hochwasserschutz und Hydrologie“ (AH).
- MATHAN, C. (2018): Die Bedeutung überregionaler Wirkungsnachweise im Nationalen Hochwasserschutzprogramm (NHWSP). In: Veranstaltungen 3/2018 „Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 84-91
- TUM - Technische Universität München (2012): Verzögerung und Abschätzung von Hochwasserwellen entlang der bayerischen Donau, Abschlussbericht



Kontakt:

Carina Schuh

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5090
E-Mail: schuh@bafg.de

2009 – 2013

Studium Physische Geographie (B.Sc.) an der Universität Frankfurt am Main

2013 – 2015

Studium Hydrologie (M.Sc.) an der Universität Stockholm/Schweden

seit 2016

Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Bundesanstalt für Gewässerkunde

Projektbearbeitung:

seit 2016: FuE-Vorhaben zum NHWSP
(Schwerpunkt Donaugebiet)



Kontakt:

Martin Schmid

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821/ 9071-5945
E-Mail:
martin.schmid@lfu.bayern.de

1981 – 1988

Studium Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München

1988 – 1990

Referendarausbildung beim Freistaat Bayern

1990 – 1998

Mitarbeiter am Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft

1999

Mitarbeiter am Bayerischen Umweltministerium

seit 2000

Mitarbeiter am Bayerischen Landesamt für Umwelt

Projektbearbeitung:

seit 2000 im Bereich Hochwasserschutz tätig

Aspekte hydraulischer Modellierung am Rhein in Nordrhein-Westfalen

Bernd Mehlig

1 Einleitung

Die hydraulische Modellierung am Rhein in Nordrhein-Westfalen (NRW) nahm ihren Anfang mit der Hochwasser-Studienkommission in den 1970er-Jahren und mit der Arbeit der „Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in NRW“ 1990. Fragestellungen zu Bemessungsgrößen, zur Statistik von Abflüssen und zu Wasserständen bei diesen Abflüssen bildeten den Ausgangspunkt für stationäre eindimensionale Arbeiten, die im Auftrag des Landes NRW von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ausgeführt wurden. Heute liegen im Zuge der Arbeiten der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser Ergebnisse von instationären zweidimensionalen Berechnungen vor, die einen vertieften Einblick in die hydraulischen Verhältnisse des Rheins in NRW gestatten.

Anhand von Beispielen hydraulischer Modellanwendung aus den vergangenen Jahrzehnten am Rhein in Nordrhein-Westfalen zeigt dieser Beitrag den Weg auf, der fachlich und gemeinsam mit Ober- und Unterliegern beschritten wurde.

2 Zusammenarbeit mit Oberlieger und Unterlieger

Bereits die 1990 einberufene „Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in NRW“ hatte neben der BfG mit Vertretern des damaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz und von Rijkswaterstaat Ober- und Unterlieger mit an Bord. Über die IKSР für das Rheineinzugsgebiet und insbesondere über die 1997 im Rahmen der ersten Hochwasserkonferenz in Arnheim gegründete Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser ergab sich in den vergangenen Jahrzehnten ein kontinuierlicher, kollegialer Austausch zu – oft gemeinsamen – hydraulischen Berechnungen und deren Ergebnissen.

3 Projekte und Vorhaben am Rhein in NRW

3.1 Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit HQ_T

Dieses Vorhaben, erarbeitet durch die o. a. „Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in NRW“, bildete die hydrologische Basis für die Festlegung von Bemessungsabflüssen am Rhein in NRW. Ausgehend von einem Datenkollektiv aus 97 Jahren (1901 – 1997) sind vom Auftragnehmer BfG 35 historische Scheitelabflüsse zusammengestellt worden. Zur Wirkungs-

abschätzung von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen wurden für den Rhein bis Andernach die drei historischen Bettzustände 1955, 1977 und 1995 sowie ein Zukunftszustand mit allen vereinbarten bzw. geplanten Maßnahmen modelltechnisch untersucht. Für den Abschnitt Andernach bis Lobith sind die Zustände 1995 und „geplant“ dann weiter untersucht worden.

Die auf Basis dieser Untersuchung erzielten und dann 2002 in einem Bericht veröffentlichten Ergebnisse haben die Grundlage geschaffen, die maßgebenden Bemessungsabflüsse für den Hochwasserschutz am Rhein in NRW festzulegen (Landesumweltamt NRW 2002). Diese Festlegung erfolgte 2003 mit einem Erlass der Obersten Wasserbehörde (MUNLV 2003) und wurde im Anschluss in Form von zugehörigen Wasserständen von den Bezirksregierungen Köln und Düsseldorf umgesetzt. Hierbei erfolgte im Rahmen der Zusammenarbeit mit der BfG die Ermittlung der maßgebenden Wasserstände auf Grundlage des BfG-Berichts-862 (BUSCH et al. 1994, 1997).

Gemäß der Vorgabe eines 10-jährigen Überprüfungsturnus sind die Abflüsse, die der Festlegung als Bemessungsgrößen zugrundeliegen, in einem Vorhaben ab 2013 überprüft worden. Die Überprüfung hat gezeigt, dass die statistischen Abflussgrößen des Erlasses aus 2004 infolge einer Anpassung der W-Q-Beziehungen an den Pegeln des Rheins in NRW durch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), dem Ausbleiben signifikanter Hochwasserereignisse in der Erweiterung der gemessenen Daten seit 1997 und der Realisierung von Hochwasserrückhaltebecken und Deichrückverlegungen an Ober- und Niederrhein numerisch eher leicht abnehmend sind.

Eine mit den heutigen Daten durchgeführte statistische Bewertung analog zur Vorgehensweise, die zu den Daten des 2004er-Erlasses führte, ergäbe somit etwas geringere Abflüsse für die Jährlichkeiten 200 a und 500 a. Der durch die bestehenden Hochwasserschutzanlagen realisierte Schutzgrad bleibt unter heutigen Bedingungen daher mindestens erhalten (MKULNV 2016).

3.2 Hochwasserschadenspotenziale am Rhein in NRW

Die Wasserspiegellagen aus vorgenanntem Vorhaben sind für die Jährlichkeiten 100 a, 200 a und 500 a in die Fläche umgesetzt worden, in dem die Höhenlage durch die Deiche hindurch ins Gelände verlängert wurden. Für die so ermittelten hochwassergefährdeten Gebiete hinter den Hochwasserschutzanlagen sind die Hochwasserschadenspotenziale berechnet worden.

In Nordrhein-Westfalen schützen ca. 320 km Hochwasserschutzanlagen rund 1.600 km² Hinterland vor Überflutung durch den Rhein, dies entspricht ca. 4 % der Flächen von NRW, auf der etwa 8 % der Bevölkerung leben. Im Regierungsbezirk Düsseldorf sind es sogar 25 % der Fläche, die durch Deiche vor Rheinhochwasser geschützt werden. Für das Jahr 2000 befanden sich im potenziellen Überflutungsgebiet des Rheins in NRW volkswirtschaftliche Werte von seinerzeit rund 250 Mrd. DM, mit den höchsten Anteilen in Duisburg (16 %), Köln (15 %) und Düsseldorf (9 %) (MURL 2000).

Die betroffenen Gebiete am Rhein gingen auch ein in die 1999 durch das damalige Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW veröffentlichte „Hochwasserfibel“ (MURL 1999) und in die 2002 erstmals vom Landesumweltamt NRW auf dessen Internetseite präsentierte „Digitale Karte der hochwassergefährdeten Bereiche“.

3.3 Niederrheinstudie

Im Jahr 2001 hat die 1997 gegründete Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser eine großangelegte Studie „Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein“ begonnen, um das Gesamtsystem deutscher Niederrhein/niederländische Rheinarme besser zu verstehen. Dieses Projekt zielte darauf ab, die nötigen Erkenntnisse zum weiteren Vorgehen im grenzüberschreitenden Hochwasserschutz zu gewinnen. Die Studie wurde von dem Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), der Provinz Gelderland, dem Landesumweltamt (LUA) in Düsseldorf und der BfG in Koblenz ausgeführt, die Ergebnisse wurden 2004 bei der Hochwasserkonferenz in Rees vorgestellt. Genutzt wurden das eindimensionale Modell SOBEK (BARNEVELD & MEIJER 1997), eingebunden in die Schale eines „Decision Support Systems“ (DSS-Niederrhein), um die Vielzahl der Berechnungen administrieren zu können. Die Berechnung der Auswirkung von Deichüberströmen auf den Wellenverlauf sowie der Entwicklung rheinparalleler Ströme erfolgte mit dem Überflutungsmodell Delft-FLS.

Die Untersuchung trug wesentlich dazu bei, das hydraulische System des Niederrheins inklusive der Auswirkungen des Deichüberströmens und der Wirkung von Maßnahmen besser zu verstehen. Insbesondere der hydraulisch bedingte Grenzwert bei Lobith (infolge des umfangreichen Deichüberströmens oberhalb), die Größenordnung der rheinparallelen Ströme nach Deichüberströmen und die Beeinflussung der Wirkung von Retentionsräumen durch Maßnahmen und Deichüberströmen oberhalb sind Beispiele für gemeinsam gewonnenes Fachwissen, das seither in vielen Folgeprojekten gewinnbringend eingesetzt werden konnte (LAMMERSEN 2004).

3.4 Aufbau und Anwendung 2D-WAQUA

Die Niederrheinstudie untermauerte die Zielsetzungen, die NRW im „Konzept für einen nachhaltigen Hochwasserschutz“ und die Niederlande in dem Projekt „Raum für den Fluss“ festgelegt haben. Zudem hat die Studie ergeben, dass die Maßnahmen am wirkungsvollsten sind, wenn sie in geeigneter Form kombiniert werden. Deshalb wurden im Nachgang zur Niederrheinstudie die einzelnen Maßnahmen unter Berücksichtigung aller Aspekte im Rahmen des Aufbaus eines zweidimensionalen Abflussmodells („WAQUA“) berücksichtigt und in ihrer Wirkung weiter optimiert. Der Datensatz wurde 2008 fertiggestellt (HKV 2008).

Im Rahmen dieser Arbeiten konnten aus der 2D-Anwendung wertvolle Erkenntnisse zur Fortschreibung des eindimensionalen Modells SOBEK gewonnen werden, die wiederum der Verbesserung der Aussagen dessen Anwendung dienen.

Eine bedeutsame Anwendung fand dieser Datensatz 2010 im Vorhaben „Hydraulische Studie zur Abfluss- und Strukturverbesserung am Rhein in NRW“. Ziel dieses Vorhabens war die hydraulisch sinnvolle Vorabstimmung von Maßnahmenkombinationen zur Beseitigung von hydraulischen Engpässen und die Integration von WRRL-Maßnahmen („Projektmaßnahmen“). Damit wurde eine Grundlage für eine gewinnbringende Planung geschaffen, in der die Belange des Hochwasserschutzes mit den Anliegen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der Schifffahrt gleichermaßen Berücksichtigung finden („Win-Win-Win-Situation“).

Die hydraulischen Prozesse wurden mit den Ergebnissen des Vorhabens nochmals verständlicher. Wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der Auswirkungen von Maßnahmen (Flutrinnen und Vorlandabtragungen sowie Gehölzstrukturen) auf Wasserstände und Strömungsbilder

konnten gewonnen werden. Darüber hinaus ist die Bedeutung der Wechselwirkung mit Hochwasserschutzmaßnahmen (z. B. Retentionspolder und Deichrückverlegungen) und eventuellen Deichüberströmungen deutlicher geworden.

Im Kern ist die Erkenntnis erzielt worden, dass die Verbesserung der Gewässerstrukturen zwischen den Deichen durch hydraulisch sinnvolle Maßnahmen erreicht werden kann, ohne dass durch Abflusshindernisse negative Auswirkungen auf den Hochwasserabfluss zu besorgen sind (LANUV NRW 2010, KUTSCHERA et al. 2011).

3.5 Grenzüberschreitende Deichringe

Teile des aufgebauten Modellinstrumentariums wurden ebenfalls für eine Risikobetrachtung der grenzüberschreitenden Deichringe 42 und 48 genutzt. In diesem Vorhaben sind Risikoansätze von beiden Seiten der Grenze in fachlichen Einklang gebracht worden, um die wechselseitige Wirkung von Überflutungen zu bestimmen. Auch die Abstimmung bzgl. der Versagensmechanismen von Hochwasserschutzanlagen und der Bestimmung von Hochwasserschadenspotenzialen wurde erreicht (SILVA et al. 2006).

Aktuell werden die neuen Ansätze zur Bewertung der Überflutungswahrscheinlichkeit in den Niederlanden (VNK2) im Rahmen einer Fortschreibung der Erkenntnisse in den beiden grenzüberschreitenden Deichringen angewendet.

3.6 Unterstützung der Bezirksregierungen Köln und Düsseldorf bei Maßnahmenplanungen

Das LANUV NRW nutzt basierend auf dem durch die o. a. Vorhaben verfügbaren Modellinstrumentarium das SOBEK-Modell mit dem Datensatz für den Niederrhein von Andernach bis Lobith in eigener Anwendung. Auf diese Art und Weise wird es möglich, dass innerhalb der Landesumweltverwaltung NRW bei einzelnen Fragestellungen zu Maßnahmen am Rhein in NRW auch Ad-hoc-Berechnungen durchgeführt werden können, um z. B. die Bezirksregierungen Köln und Düsseldorf in ihren Verfahren unmittelbar zu unterstützen.

Beispiele dafür sind „Was-wäre-wenn“-Betrachtungen hinsichtlich Breite und Höhe von Einlaufbauwerken der Retentionspolder, Reichweite der Wasserstand senkenden Wirkungen von Maßnahmen oder Veränderungen von Wasserständen bei geänderter Deichlinie infolge anstehender Sanierung. Der Fokus dieser Berechnungen liegt dabei darauf, die Auswirkungen im Gewässer durch die Betrachtung des Zustandes vor im Vergleich zum Zustand nach Umsetzung der Maßnahme zu beschreiben. Eine kleinskalige Nutzung, z. B. im Rahmen der Ausführungsplanung, kann mit dem SOBEK-Datensatz nicht geleistet werden.

Ergebnisse dieser NRW-internen Berechnungen, insbesondere die maßgebenden Planungsvarianten von Bauwerken und ihre modelltechnische Abbildung gingen auch ein in die Arbeiten der IKSR-Expertengruppe HVAL, die die Evaluierung des IKSR-Aktionsplans bearbeitet hat (IKSR 2012).

3.7 Abstimmung bei der grenzüberschreitenden Darstellung in Gefahrenkarten nach Hochwasserrisikomanagementrichtlinie

Nachdem für den Rhein im ersten Zyklus der Bearbeitung der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie noch die jeweils verfügbaren Berechnungen für das Szenario „Extremes Hochwasser“ in den Gefahrenkarten verwendet wurden, ist für den zweiten Zyklus eine weitergehende grenzüberschreitende Abstimmung vorgesehen.

Aktuell hat hierzu Rijkswaterstaat mit fachlicher Einbindung Nordrhein-Westfalens ein Modellkonzept beauftragt, das zwischen den Deichen einen eindimensionalen Rechenkern auf SOBEK-Basis und landseits der Deiche ein zweidimensionales Überflutungsmodell mit flexibler Maschenweite vorsieht („Flexible Mesh“). Auf dieser Basis soll für den grenzüberschreitenden Bereich eine Anpassung der jeweiligen betroffenen Flächen und der Wasserstände erreicht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Nutzen und Anwendungsrahmen der hydraulischen Modellierung wird häufig mit „Ermittlung von Grundlagendaten der Wasserwirtschaft“ oder „Bearbeitung gewässerkundlicher Fragestellungen“ umschrieben.

Diese Formulierungen erscheinen angesichts der genannten Anwendungsbereiche zu zurückhaltend. Am Rhein in Nordrhein-Westfalen unterstützt die Anwendung der hydraulischen Modelltechnik unmittelbar den Vollzug z. B. durch Bereitstellung der Informationen, die zu Bemessungsgrößen führen oder der Entscheidungsunterstützung dienen.

Durch eine adressatenorientierte Visualisierung von Ergebnissen, z. B. Überflutungsberechnungen, können maßgebende Szenarien für Behörden, aber auch für Bürger erfassbar und begreifbar gemacht werden.

Insoweit ist die hydraulische Modellierung ein heute unverzichtbarer Baustein der zivilen Infrastruktur, um die Ziele der Daseinsvorsorge zu erreichen. Neben geeigneten Bemessungsgrößen für Hochwasserschutzanlagen gehören hierzu auch Beiträge zur Planung der Gefahrenabwehr und Informationen für Betroffene.

Für die Herausforderungen am Niederrhein hat sich bei der hydraulischen Modellierung die Zusammenarbeit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, der niederländischen Kolleginnen und Kollegen von Rijkswaterstaat sowie der Provinz Gelderland und der Behörden in Nordrhein-Westfalen als sehr gewinnbringend erwiesen, dies betrifft sowohl die fachliche Qualität und Weiterentwicklung als auch die kollegiale Zusammenarbeit.

Literatur

- BARNEVELD, H. J., D. G. MEIJER (1997): SOBEK-Model Andernach-Lobith, Model construction, calibration and verification, Final report of a cooperative project RIZA-BfG; 46 S., Anlagen
- BUSCH, N., U. CHOJETZKI, H. ENGEL, P. J. GUNDERT (1994): Wasserspiegellagenberechnungen am Rhein vom Pegel Köln bis zur deutsch/niederländischen Grenze, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-862
- BUSCH, N., U. CHOJETZKI, H. ENGEL (1997): Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnung am Rhein in Nordrhein-Westfalen – Ergänzung zum BfG-Bericht BfG-862
- HKV (2008): Grenzüberschreitende Abstimmung wasserstandssenkender Maßnahmen 2D-Berechnungen mit WAQUA. J. H. A. Wijbenga, A. J. Paarlberg, J. Vieira da Silva und G. P. van Wijk, HKV-Bericht PR1350, November 2008

- IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2012): Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser 1995 – 2010 einschließlich Vorausschau für 2020 sowie 2020+; IKSR-Bericht 199, ISBN 3-941994-18-2978-3-941994-18-8
- KUTSCHERA, G., H. BARNEVELD, B. MEHLIG, M. BRINKMANN, R. LAMMERSEN (2011): Abfluss- und Strukturverbesserung am Niederrhein – ein hydraulischer Ansatz zur Vereinbarkeit von Hochwasserschutz und Strukturverbesserung. Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 30.11, ISBN: 978-3-941897-79-3
- Landesumweltamt NRW (2002): Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit HQ_T an den Pegeln des Rheins, ISSN 1610-9619
- LANUV NRW – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2010): Hydraulische Studie zur Abfluss- und Strukturverbesserung am Niederrhein – HyStAT (Projektbericht)
- LAMMERSEN, R. (2004): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Abschlussbericht, Juli 2004, ISBN 9036956382. („Niederrheinstudie“)
- MEIBNER, D. (2008): Erstellung, Kalibrierung und Validierung des SOBEK-Modells für die Rheinstrecke zwischen den Pegeln Andernach und Lobith im Rahmen des Projekts „Grenzüberschreitende Abstimmung von Hochwasser mindernden Maßnahmen“ der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1593
- MKULNV – Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz. Nordrhein-Westfalen (2016): Festsetzung des Bemessungshochwassers für den Rhein; Erlass IV-6 - 4290 v. 08.12.2016
- MUNLV – Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2003): Grundsätze für die Bemessung der Hochwasserschutzanlagen am Rhein in Nordrhein-Westfalen; Erlass IV-10 - 4290 v. 18.09.2003
- MURL – Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (1999): Hochwasserfibel – Bauvorsorge in gefährdeten Gebieten, Broschüre
- MURL – Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (2000): Potentielle Hochwasserschäden am Rhein in NRW: Kurzfassung der Forschungsstudie „Hochwasserschadenspotentiale am Rhein in Nordrhein-Westfalen“
- SILVA, W., C. REUTER, J. KÖNGETER [et al.] (2006): Risikoanalyse für die grenzüberschreitenden Deichringe am Niederrhein - Phase I: Entwicklung einer gemeinsamen Untersuchungsmethode. Aachen, Arnheim: Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser

Kontakt:

Bernd Mehlig

Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz NRW

Auf dem Draap 25

40225 Düsseldorf

Tel.: 02361/ 305 2214

E-Mail:

bernd.mehlig@lanuv.nrw.de

1988 – 1991

Studium Bauingenieurwesen an der Universität der
Bundeswehr München, Neubiberg

1994 – 1996

Referendariat für den höheren technischen Verwal-
tungsdienst der Fachrichtung Wasser- und Abfall-
wirtschaft in NRW

seit 1996

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucher-
schutz Nordrhein-Westfalen

Hydraulische Modellierung bei der Wasserstands- vorhersage für Bundeswasserstraßen

Dennis Meißner und Silke Rademacher

1 Einleitung

Für die Binnenschifffahrt auf den frei fließenden Wasserstraßen bilden aktuelle sowie zu erwartende Wasserstände eine zentrale gewässerkundliche Information und sind unabdingbare Voraussetzung, um die gesamte Logistikkette vom Binnenschiff über die verladende Wirtschaft bis hin zur Anbindung landgebundener Verkehrsträger wirtschaftlich optimiert zu betreiben. Vor diesem Hintergrund entwickelt, pflegt und betreibt die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur seit mehreren Jahrzehnten Vorhersagemodelle und -systeme für die Bundeswasserstraßen im Binnenbereich, die bereits seit den 90er-Jahren des vorigen Jahrhunderts im operationellen Einsatz sind (HEINZ 1997, FRÖHLICH et al. 1998, MEIßNER & RADEMACHER 2010).

Zur Berechnung der Strömung in den als Wasserstraße genutzten Gewässern sowie in bedeutenden Nebenflüssen kommen in den Vorhersagesystemen der BfG hydrodynamisch-numerische (HN-) Modelle zum Einsatz. Auch in der Hochwasservorhersage, deren Zuständigkeit bei den Bundesländern liegt, werden primär an größeren Flüssen HN-Modelle eingesetzt, um den Wellenablauf adäquat abzubilden (VOGELBACHER 2014, DEMUTH & RADEMACHER 2016). Somit stellt die operationelle Vorhersage im gesamten Abflussspektrum einen wichtigen und zugleich herausfordernden Anwendungsbereich hydrodynamischer Modelle, im Weiteren auch als hydraulische Modelle bezeichnet, dar.

Die sich aktuell im operationellen Einsatz zur verkehrsbezogenen Vorhersage befindlichen HN-Modelle im Rhein-, Elbe-, Donau- und Eder-/Fuldaeinzugsgebiet sowie am Nord-Ostsee-Kanal erstrecken sich über insgesamt rund 2.700 Gewässerkilometer. Abbildung 1 stellt im linken Teil die Vorhersagesysteme des Bundes zur Wasserstands- und Abflussvorhersage im Binnenbereich dar. Im rechten Teil der Abbildung sind die innerhalb dieser Vorhersagesysteme (siehe auch Kapitel 3) betriebenen hydraulischen Modelle in ihrer räumlichen Ausdehnung aufgetragen. Die großräumige Modellskala sowie die Anforderungen an die operationell eingesetzten Vorhersagemodelle bedingen, dass es sich derzeit an allen Wasserstraßen um eindimensionale (1D) HN-Modelle handelt. Mitunter, wenn bei hinreichender Genauigkeit möglich, finden auch vereinfachte hydraulische Ansätze zur Strömungsberechnung Anwendung (siehe Kapitel 2).

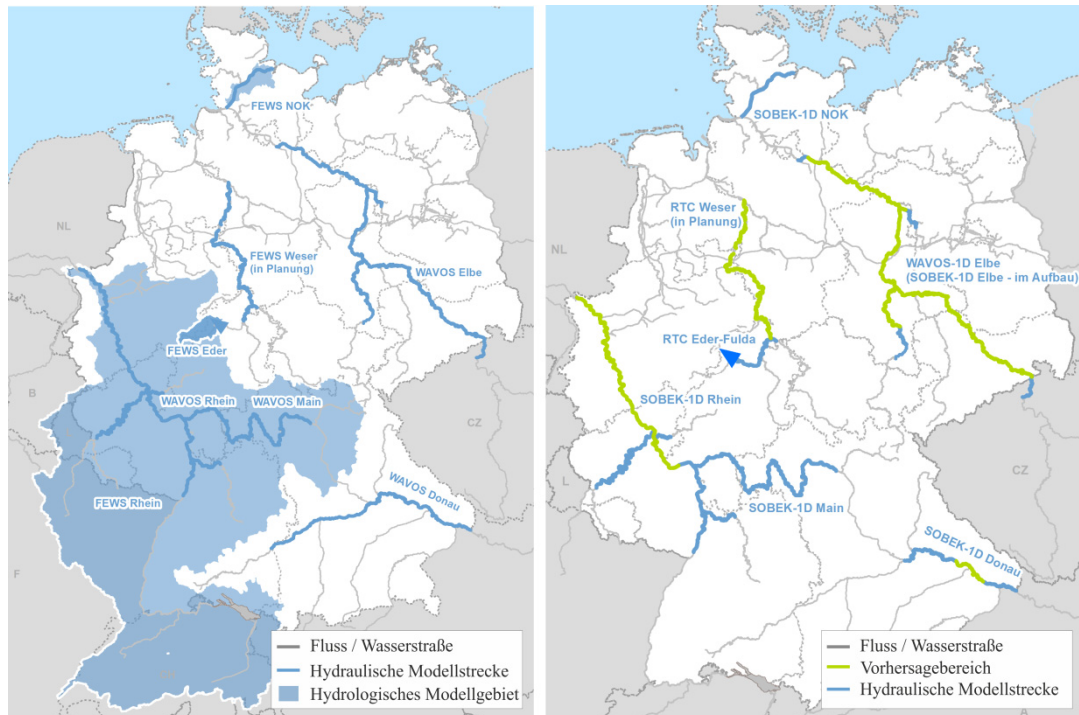


Abb. 1: Links: Übersicht der Vorhersagesysteme des Bundes zur Wasserstands- und Abflussvorhersage an den Binnenwasserstraßen, rechts: hydraulische Modellstrecken als Bestandteil der Vorhersagesysteme

Zum Betrieb der hydraulischen Vorhersagemodelle ist über den gesamten Berechnungszeitraum die Angabe von Randbedingungen notwendig, d. h. am oberen Modellrand muss der Zufluss und am unteren Modellrand der Wasserstand bzw. eine Wasserstand-Abfluss-Beziehung vorgegeben werden. Ebenso wird die zeitliche Entwicklung der seitlichen Zuflüsse ins Modellgebiet benötigt. Bei der Simulation der Vergangenheit kann hier jeweils auf Messwerte zurückgegriffen werden. Zur Berechnung der in der Zukunft liegenden Vorhersage müssen für sämtliche Zuflüsse und den Wasserstand am unteren Modellrand ebenso Vorhersagen vorliegen. Diese Zuflussvorhersagen wurden in den 1990er-Jahren von den Anwendern abgeschätzt oder innerhalb der Vorhersageumgebung mit Hilfe von statistischen Mehr-Kanal-Filter-Modellen, die anfänglich auch für die gesamte Vorhersageberechnung verwendet wurden (WILKE 1984), berechnet. Die Vorhersagezeiträume lagen im Bereich von Stunden bis wenigen Tagen für die großen Flüsse. Die aktuellen Anforderungen, aber auch die methodisch-technischen Möglichkeiten, gehen deutlich darüber hinaus, so dass heute die Vorhersagen von Zuflüssen und Wasserständen anderer Vorhersagezentralen (z. B. wasserwirtschaftliche Dienststellen der Bundesländer, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) verwendet werden oder die Berechnung der Zuflussvorhersagen intern über Wasserhaushaltsmodelle, die jeweils das gesamte Einzugsgebiet abbilden (s. Abb. 1, links), erfolgt.

2 Anforderungen an HN-Modelle im operationellen Betrieb

Die große Bedeutung hydraulischer Modelle für die Wasserstandsvorhersage an den Bundeswasserstraßen wird dadurch deutlich, dass die BfG in den 1990er-Jahren neben dem Vorhersagesystem WAVOS auch das darin integrierte eindimensionale hydraulische Modellsystem

WAVOS-1D, das eigens für den Einsatz in der Vorhersage konzipiert wurde, entwickelt hat (STEINEBACH 1999). WAVOS-1D war über mehrere Jahrzehnte und ist z. T. bis heute im operationellen Einsatz an Bundeswasserstraßen (s. Abb. 1). Inzwischen basiert der überwiegende Teil der HN-Modelle auf dem kommerziellen Softwarepaket SOBEK (STELLING & DUINMEIJER 2003).

Im Kontext der Vorhersage werden hydraulische Modelle ausschließlich instationär betrieben, um die zeitlich variablen Durchflussverhältnisse und Wasserstandsverläufe an den Vorhersagepegeln abbilden und prognostizieren zu können. Demzufolge steht beim Aufbau und der Aktualisierung hydraulischer Modelle, die (auch) zur Vorhersage eingesetzt werden sollen, die instationäre Modellkalibrierung und -validierung besonders im Fokus.

Trotz fortschreitender Entwicklung der Rechentechnik spielt der Aspekt der Rechenzeit weiterhin eine entscheidende Rolle für großräumig ausgelegte Vorhersagemodelle, wie im Fall der Wasserstraßen. Die erforderliche Zeit für einen Berechnungslauf des HN-Modells sollte wenige Minuten nicht überschreiten. Wenn auch verkehrsbezogene Vorhersagen weniger zeitkritisch sind als Hochwasservorhersagen, so birgt die sich in den letzten Jahren auch in der Vorhersagepraxis etablierte Ensembletechnik neue Herausforderungen (MEIßNER et al. 2014). So müssen für eine einzelne probabilistische Mittelfristvorhersage (s. Abb. 2) sowohl das hydrologische wie auch das HN-Modell 72 Mal einen Berechnungszeitraum von 10 Tagen (also insgesamt 720 Modell-Tage = ca. 2 Modell-Jahre) im Stundenzeitschritt durchlaufen. Neben rechentechnischen Möglichkeiten zur Steigerung der Rechenleistung (z. B. Parallelisierung der einzelnen Berechnungsläufe für jedes Ensemblemitglied) bietet auch die räumliche Diskretisierung Optimierungspotenzial. Hier gilt es, einen Kompromiss zwischen der möglichst exakten Berechnung des Wellenablaufs und der Rechenzeit zu finden, in dem z. B. in Gewässerabschnitten mit relativ gleichförmiger Geometrie das Berechnungsgitter gröber ausgestaltet wird. Auch die Vereinfachung von Bauwerkssteuerungen im Modell oder umgekehrt auch die Verwendung von vereinfachten hydrodynamischen Modellgleichungen, wenn die Optimierung der Bauwerkssteuerung im Vordergrund steht (z. B. RTC Eder (CEMUS & HOHENRAINER 2017)), kann ein adäquates Mittel zur Rechenzeitoptimierung in der Vorhersage sein.

Ein weiterer Aspekt ist die numerische Stabilität und Robustheit, um einen reibungslosen Vorhersageablauf, der zunehmend (teil-)automatisiert erfolgt, zu gewährleisten. Wenn auch im Vorhersageprozess die Modelleingangsdaten kontrolliert werden, so werden Vorhersagemodelle weitestgehend mit Rohdaten betrieben. In gewissem Umfang müssen daher die Modelle auch mit fehlerbehafteten Werten umgehen können, ohne einen Abbruch zu erzeugen. Gleiches gilt für Extremereignisse, die außerhalb des zur Modellkalibrierung verwendeten Ereigniskollektivs liegen. Die Modelle müssen in diesem Fall, in Vertrauen auf die Gültigkeit der zugrundegelegten Formulierungen der Prozesse, außerhalb ihres „Erfahrungsraums“ quasi extrapolieren, und auch in diesen Bereichen stabile Berechnungen und grundsätzlich sinnvolle Ergebnisse gewährleisten. Dieser Aspekt ist umso wichtiger, als der Vorhersager, der in aller Regel nicht der Modellersteller ist, zumeist nicht die technischen oder auch fachlichen Möglichkeiten besitzt, um Programmabbrüche in einem HN-Modell korrekt diagnostizieren und beheben zu können.

3 Hydrodynamisch-numerische Modelle als Teil einer Vorhersagekette

Zum Zweck der operationellen Vorhersage erfolgt der Betrieb der hydraulischen Modelle nicht innerhalb der modelleigenen Benutzerumgebung, sondern als integraler Bestandteil eigens aufgebauter Vorhersagesysteme. In den meisten Fällen kommen neben hydraulischen noch weiterer Modelle zum Einsatz (s. Abb. 2), die allesamt vom Anwender zu bedienen und deren reibungsloser Ablauf zu überwachen sind. Darüber hinaus darf nicht außer Acht gelassen werden, dass Modelle lediglich einen Baustein im Vorhersageprozess darstellen und insbesondere die große Zahl der für eine Vorhersage erforderlichen (Echtzeit-)Daten zu organisieren ist. Letztlich erfordert die operationelle Vorhersage ein gutes Zusammenspiel von Daten und Modellen.

Die Vorhersagesysteme, in welche die eigentlichen Vorhersagemodelle „eingebettet“ sind, steuern zum einen die genannte Verknüpfung der für die Vorhersageberechnung erforderlichen Eingangsdaten (hydrologische und hydrometeorologische Messdaten, meteorologische Vorhersage, hydrologische Vorhersagen Dritter etc.) mit den Modellen. Darüber hinaus regeln die Vorhersagesysteme die häufig erforderliche sequentielle Kopplung unterschiedlicher Modelle (z. B. hydrologischer und hydrodynamischer Modelle) sowie entsprechende Nachprozessierungen von Modellergebnissen im Anschluss an die eigentliche(n) Berechnung(en). Am Ende des Vorhersageprozesses stehen die in unterschiedlichen Formaten und auf unterschiedlichen Wegen publizierten Vorhersagen bzw. Vorhersageprodukte. Abbildung 2 stellt am Beispiel des aktuellen Workflows zur Erstellung probabilistischer Wasserstandsvorhersagen mit einem Vorhersagezeitraum von 10 Tagen für abladerelevante Pegel am Rhein die Verknüpfung des HN-Modells mit weiteren Komponenten in der Vorhersagekette exemplarisch dar. Der Vorhersageablauf besteht aus folgenden fünf Schritten:

- > Berechnung von Abfluss-Ensemblevorhersagen mit dem hydrologischen Modell (im Rheingebiet aktuell HBV) auf der Basis meteorologischer Ensemblevorhersagen („rohes“ Ensemble) als Eingangsgröße für die Zuflusspegel zum HN-Modell
- > Ermittlung der probabilistischen Vorhersage aus den Abfluss-Ensemblevorhersagen mit dem statistischen Verfahren EMOS (Ensemble Model Output Statistics) (HEMRI et al. 2014, KLEIN et al. 2015)
- > Ermittlung von realistischen Ganglinienverläufen in Raum und Zeit aus den probabilistischen Vorhersagen an den Rändern des HN-Modells mittels ECC (Ensemble Copula Coupling) (KLEIN et al. 2015)
- > Berechnung von Wasserstandsvorhersagen für die Vorhersagepegel mit dem 1D HN-Modell (am Rhein aktuell SOBEK), Randbedingungen sind die prä-prozessierten Abflussensembles
- > Ermittlung von probabilistischen Wasserstandsvorhersagen mit EMOS und Generierung der wahrscheinlichkeitsbasierten Vorhersageprodukte

Der Einsatz statistischer Verfahren zur Postprozessierung macht es erforderlich, neben der operationellen Modellkette eine quasi „gespiegelte“ Offline-Variante einsatzbereit vorzuhalten und zu pflegen (rechter Teil in Abb. 2). Dieser zusätzliche Workflow, in den selbstverständlich auch das HN-Modell integriert ist, dient dazu, um auf Basis sog. Hindcasts (retrospektive Vorhersagen) die statistischen Modelle optimal zu parametrisieren und auch die Güte der Vorhersagen bewerten/quantifizieren zu können.

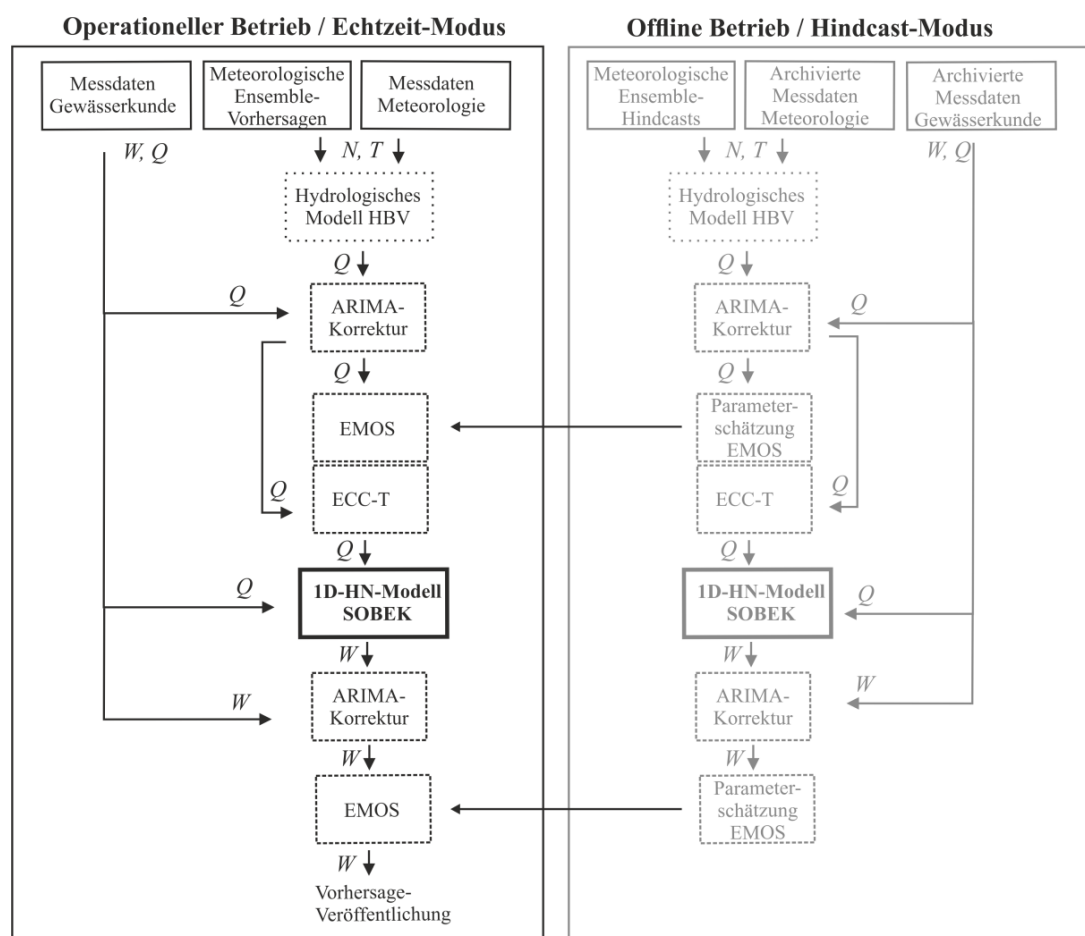


Abb. 2: Schematische Darstellung des Vorhersage-Workflows zur Erstellung probabilistischer Mittelfristvorhersagen für den Rhein, links: Echtzeit-Ablauf, rechts: Offline zur Ermittlung der Parameter der statistischen Unsicherheitsprozessoren

Die für die verschiedenen Wasserstraßen individuell konfigurierten Vorhersagesysteme der BfG basieren auf den Vorhersageplattformen WAVOS (RADEMACHER et al. 2004) und Delft-FEWS (WERNER et al. 2013). Neben Modulen zur automatisierten Verarbeitung von Mess- und Vorhersagedaten stellen die Vorhersagesysteme dem Anwender zudem eine separate Benutzeroberfläche zur Verfügung, welche sich von den originären Oberflächen der einzelnen Modellsysteme, sofern solche existieren, deutlich unterscheidet. Vorhersagesysteme und ihre Benutzeroberfläche sind auf einen effizienten und zumeist auch weitestgehend automatisierten Einsatz von Modellen ausgerichtet. Hierbei besitzt die übersichtliche Darstellung der Eingangsdaten aber auch der Modellergebnisse/Vorhersagen zum Zweck der fachlichen Plausibilisierung und Bewertung sowie unter Umständen zur Korrektur einen hohen Stellenwert und leistet einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von Unsicherheiten in der Vorhersage (VOGELBACHER 2014). WAVOS und Delft-FEWS verfolgen im Gegensatz zu modellbezogenen Vorhersagesystemen, die explizit um ein spezifisches Modell/Modellkonzept herum konzipiert sind, einen primär datenbezogenen Ansatz. Definierte Schnittstellen und spezifische Konverter für eine Vielzahl gängiger Datenformate ermöglichen die Anbindung unterschiedlicher Modellsysteme an das Vorhersagesystem. Die Systeme kommunizieren mit den externen Modellen, ohne in ihre originären Strukturen einzugreifen. Anfangs- und Randwertinformationen werden zentral verwaltet und die Modelle angesteuert. Im Fall von Delft-FEWS

wird auch der Modellbetrieb im Ensemblemodus explizit unterstützt. Abbildung 3 zeigt ausgewählte Ansichten der Benutzeroberflächen der operationellen Vorhersagesysteme Delft-FEWS (oben) und WAVOS (unten) für die Wasserstraße Rhein.

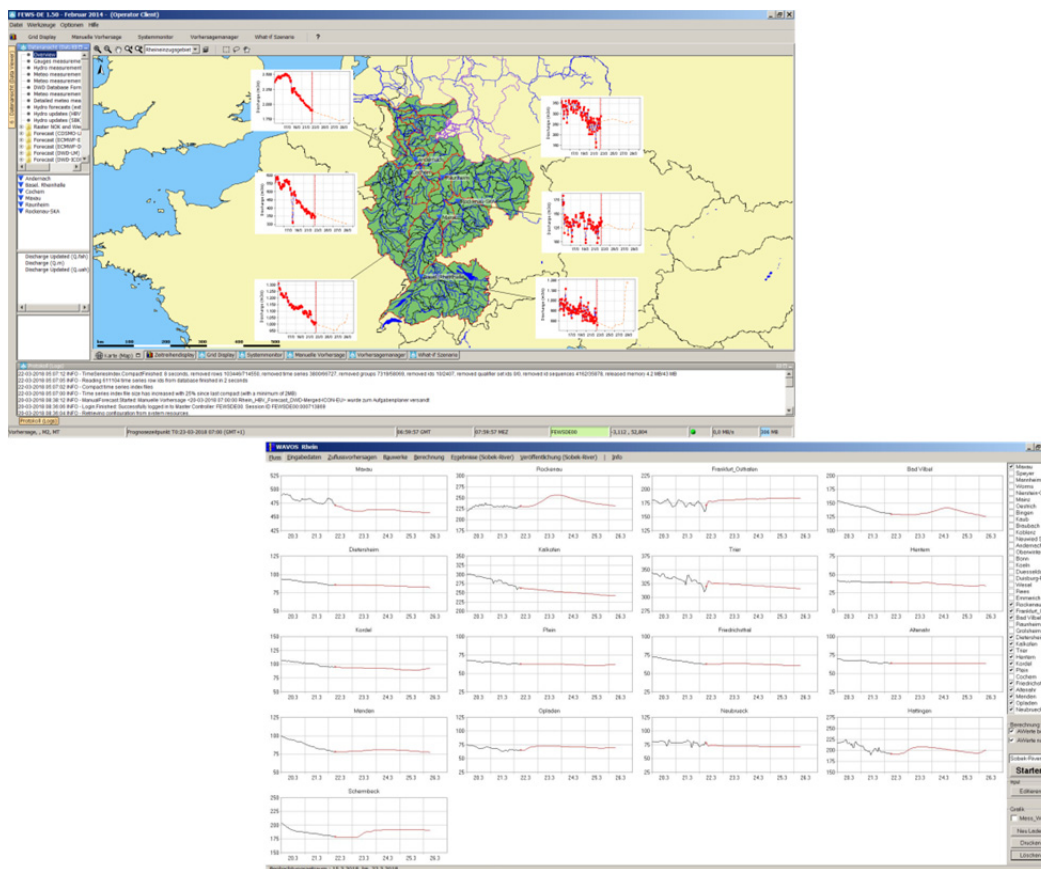


Abb. 3: Benutzeroberfläche der operationellen Vorhersagesysteme der BfG für das Rheingebiet: Delft-FEWS (oben), WAVOS (unten)

So essentiell Vorhersagesysteme auch für den operationellen Betrieb von Modellen innerhalb etablierter Workflows sind, so bedingt eignen sich diese Systeme in aller Regel für den Aufbau neuer bzw. die Aktualisierung bestehender (hydraulischer) Modelle. Der Zugriff auf Modellfunktionalitäten ist für den Anwender von Vorhersagesystemen zugunsten einer gesteigerten Übersichtlichkeit bewusst begrenzt und fokussiert auf zuvor definierte Workflows. Somit finden umfangreichere Modellanpassungen sowie Aufbau, Kalibrierung und Validierung von Vorhersagemodellen oft außerhalb der Vorhersagesysteme in den originären Umgebungen der Modellsysteme statt.

4 Modell- und Vorhersageunsicherheiten

Ein weiterer wichtiger Unterschied von Vorhersagemodellen zu vielen anderen Modellanwendungen ist die Tatsache, dass sich Vorhersagen kontinuierlich, in der Regel mehrmals täglich, mit der Realität messen lassen müssen. Die Güte von Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen und damit auch implizit die Güte der zur Vorhersage eingesetzten Modelle stehen unter ständiger Beobachtung der Nutzer und können von diesen durch den Vergleich mit den

tatsächlich eingetretenen Daten auch recht einfach beurteilt werden. Dies ist ein großer Unterschied zu einer Vielzahl anderer Anwendungen von HN-Modellen, wie z. B. Fragestellungen der Bemessung oder zu Auswirkungen klimatischer Veränderungen. Die Nachprüfbarkeit, wenn überhaupt möglich, ist bei diesen Modellanwendungen für Außenstehende äußerst schwierig.

Zudem verlangt die operationelle Vorhersage, zumindest mit kurz- bis mittelfristigen Vorhersagezeiträumen, die Ermittlung absoluter Werte, da die Nutzer nur auf dieser Basis ihre Entscheidungen (z. B. über die Abladung eines Schiffes) treffen können. Demgegenüber erfordert eine Vielzahl an Untersuchungen, zu denen HN-Modelle herangezogen werden, ausschließlich relative Aussagen, so dass sämtliche Berechnungen auf einen Referenzmodelllauf bezogen werden, um so Modellunsicherheiten weitestgehend aus den Ergebnissen auszuschließen. Dies ist zumindest bei Kurz- bis Mittelfristvorhersagen nicht möglich. Vor diesem Hintergrund kommt auch der Aktualität der den Vorhersagemodellen zugrundeliegenden Geobasisdaten eine große Bedeutung zu, und die HN-Modelle müssen (i. d. R. abschnittsweise) regelmäßig aktualisiert werden.

Vorhersageunsicherheiten entstehen zwangsläufig in jeder Komponente der Vorhersagekette (siehe Kapitel 3). Dies betrifft bereits die operationellen – und damit als ungeprüfte Rohdaten vorliegenden – meteorologischen wie hydrologischen Beobachtungsdaten durch Ungenauigkeiten oder Ausfälle in der Messwerterfassung. Hinzu kommen weitere Unsicherheitsquellen, wie insbesondere die erforderliche Umrechnung von Wasserständen in Abflüsse und die räumliche Interpolation meteorologischer Daten auf die Recheneinheiten des hydrologischen Modells.

Aber auch die Vorhersagemodelle selbst sind mit Unsicherheiten behaftet. Sie stellen stets eine Vereinfachung und Abstraktion der Natur – sowohl hinsichtlich der physikalischen Prozesse wie auch der raum-zeitlichen Struktur – dar. Die sog. strukturelle Modellunsicherheit entsteht durch die vereinfachte Abbildung der Realität im Modell, in der evtl. entscheidende Prozesse nicht oder nicht adäquat abgebildet werden, und durch die Diskretisierung des Modells. Parameterunsicherheit entsteht aus der Kalibrierung des Modells, da viele Modellparameter nicht direkt gemessen werden können und im Allgemeinen anhand gemessener Abflüsse und Wasserstände außerhalb des operationellen Einsatzes kalibriert werden müssen. In Bezug auf die Kalibrierung und den späteren Einsatz der Modelle ist auch zu unterscheiden, ob das jeweilige Ereignis innerhalb oder außerhalb des zur Modellkalibrierung herangezogenen Ereigniskollektivs liegt. Prinzipiell wächst die Unsicherheit, wenn Modelle in extremen Bereichen von Hoch- wie auch Niedrigwasser betrieben werden, für die nur wenig oder gar keine Beobachtungsdaten zur Kalibrierung verfügbar waren. Das Wiederkehrintervall des Ereignisses trägt also entscheidend zur Unsicherheit seiner Vorhersagen bei.

Eine weitere Unsicherheitsquelle bilden anthropogene Einflüsse auf das modellierte Natursystem, z. B. in Form von Steuerungen von Staustufen am Gewässer. Sofern die Steuerungen für die Modellierung der Wasserstände relevant sind, wie dies im Fall von gesteuerten Staustufen am Gewässer der Fall ist, sind diese i. d. R. vereinfacht im Modell implementiert. Weicht nun die reale Steuerung von den im Modell hinterlegten Steuerungsvorschriften ab, kann dies zu merklichen Unsicherheiten in der Vorhersage führen. Gleiches gilt für den Fall nicht vorhersehbarer Änderungen im modellierten System, z. B. im Fall extremer Hochwasser eintretender Deichbrüche.

Grundsätzlich wächst die Unsicherheit mit zunehmender Länge des Vorhersagezeitraums an. Die Ursache dafür liegt darin, dass unterschiedliche Einflüsse entlang des Vorhersagezeitraums bestimmend sind. Die größte Genauigkeit erreichen Wasserstandsvorhersagen, deren Vorhersagehorizont innerhalb der Fließzeit gemessener Daten an Oberliegerpegeln liegt. Die Unsicherheit steigt deutlich an, wenn die Vorhersage sich bei wachsendem Vorhersagezeitraum auf die im Einzugsgebiet des vorherzusagenden Pegels gemessenen Niederschläge stützt, und noch größer wird die Unsicherheit bei der Erfordernis zur Einbeziehung von Wettervorhersagen. Die Übergänge hierbei müssen nicht kontinuierlich erfolgen, sondern können sich auch sprunghaft einstellen.

Am Beispiel der Rheinpegel Kaub (Rhein-km 546,3), Koblenz (Rhein-km 591,5) und Duisburg-Ruhrort (Rhein-km 780,8), für die die BfG operationelle verkehrsbezogene Wasserstandsvorhersagen außerhalb von Hochwassern erstellt und über den Elektronischen Wasserstraßen-Informationsservice ELWIS der WSV veröffentlicht, zeigt Abb. 4 eine Abschätzung, wie sich entlang des Vorhersagezeitraums der Anteil des HN-Modells am mittleren Gesamtvorhersagefehler verändert. Dabei ist zu beachten, dass sich die eigentlichen Modellfehler nicht ohne Weiteres von den Unsicherheiten der Messdaten oder der Wasserstand-Abfluss-Beziehungen an den Modellzuflüssen separieren lassen.

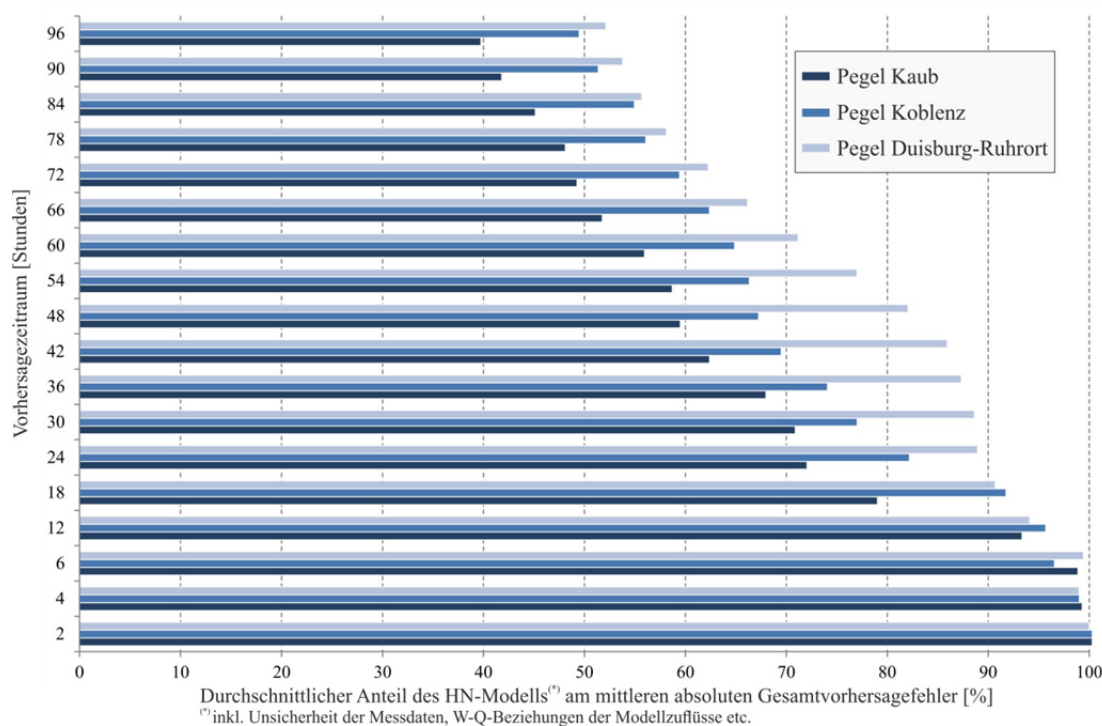


Abb. 4: Abschätzung des prozentualen Anteils der Unsicherheit des HN-Modells am mittleren absoluten Gesamtvorhersagefehler an den Rheinpegel Kaub, Koblenz und Duisburg-Ruhrort (Zeitraum 11/2015 – 11/2017)

Deutlich erkennbar ist, dass mit zunehmendem Vorhersagezeitraum neben dem HN-Modell sukzessive weitere Unsicherheitsquellen (z. B. Unsicherheit des Wasserhaushaltsmodells, Unsicherheit in den regionalisierten Niederschlagsmessdaten, Unsicherheit der Wettervorhersage etc.) Einfluss auf den Gesamtvorhersagefehler nehmen. Ersichtlich werden auch die Unterschiede zwischen den verschiedenen Pegeln. So liegt der Anteil des HN-Modells am

mittleren Gesamtvorhersagefehler für den Mittelrheinpegel Kaub bei rund 70 % bei einem Vorhersagezeitraum von 30 Stunden, während für den Niederrheinpegel Duisburg-Ruhrort dieser Anteil erst bei einem etwa doppelt so langen Vorhersagezeitraum erreicht wird. Die Unsicherheitsanteile hängen neben dem Pegelstandort auch entscheidend von der Abflusssituation ab. In Niedrig-/Mittelwasserphasen mit weitgehend konstanten oder leicht sinkenden Wasserständen, in denen die Dynamik der Zuflüsse gering ausfällt, kommt dem HN-Modell eine gesteigerte Bedeutung zu. Auch wenn das HN-Modell nur eine Unsicherheitsquelle von vielen ist, und mit zunehmender Länge des Vorhersagezeitraums andere Unsicherheitsquellen verstärkt Einfluss auf die Gesamtvorhersageunsicherheit gewinnen, so wird dennoch die Bedeutung eines gut kalibrierten und aktuellen HN-Modells für kurz- bis mittelfristige Wasserstandsvorhersagen an den Wasserstraßen deutlich.

5 Ausblick

Gestern wie heute werden auch in absehbarer Zukunft hydraulische Modelle eines der Modellwerkzeuge zur Wasserstandsvorhersage an den Bundeswasserstraßen darstellen. Die bestehenden hohen Ansprüche an die Modelle in Bezug auf Genauigkeit, Aktualität, Robustheit und Performanz werden bestehen bleiben, wenn nicht sogar steigen. Neben dem Trend zu ensemblebasierten Vorhersagen zeichnen sich zur Unterstützung komplexer Managementaufgaben an den Wasserstraßen, wie z. B. der Steuerung von Anlagen etwa an Talsperren oder Kanälen, der Bedarf an einer Integration modellbasierter, prädiktiver Optimierungsalgorithmen in den probabilistischen Vorhersageprozess ab. Solche Optimierungsmodelle sind in der Lage, die zukünftige Wirkung einer großen Zahl möglicher Entscheidungen/Steuerstrategien unter Berücksichtigung von Vorhersagen zu simulieren und hinsichtlich eines Optimums zu bewerten, woraus fundierte Entscheidungsvorschläge abgeleitet werden können. Derzeit werden hierzu noch überwiegend vereinfachte hydrodynamische Modelle eingesetzt, die Entwicklung der IT-Technik lässt allerdings auch hier eine Steigerung der Komplexität der eingesetzten Modelle erwarten. Gleiches gilt für den bis dato ausschließlichen Einsatz von 1D-Modellen zur großräumigen Wasserstandsvorhersage. Absehbare Entwicklungen sind der Einsatz gekoppelter 1D-2D-Modellansätze oder auch (zumindest abschnittsweise) der Einsatz vollständiger 2D-HN-Modelle.

Bei allen technischen Möglichkeiten spielt für die Vorhersage stets die operationelle Handhabbarkeit sowie die Balance zwischen Daten, Modellen und Nutzeranforderungen eine zentrale Rolle. Somit wird auch in Zukunft gelten: Vorhersagesysteme und -modelle sollten so komplex wie nötig, aber so einfach wie möglich sein.

Literatur

- CEMUS, J., J. HOHENRAINER (2017): Von der Modellberechnung zur Abgabeentscheidung an der Edertalsperre. In: Veranstaltungen 3/2017 „Statistische Methoden in der hydrologischen Vorhersagepraxis und deren Nutzen“. Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 46-48, http://dx.doi.org/10.5675/BfG_Veranst_2017.3
- DEMUTH, N., S. RADEMACHER (2016): Flood Forecasting in Germany – Challenges of a federal structure and transboundary cooperation. In: Adams, Th. und Pagano, Th.: Flood Forecasting - A Global; Perspective. Academic Press. S. 125-151, DOI: 10.1016/B978-0-12-801884-2.00005-0

- FRÖHLICH, W., M. HEINZ, G. STEINEBACH, K. WILKE (1998): Water level forecasts for navigation on the river Elbe and river Rhine - A contribution to an intelligent waterway. Proc. 29th PIANC International Navigation Congress The Hague 1998, Section I, subject 3, International Navigation Association, pp. 55-60
- HEINZ, M. (1997): Wasserstandsvorhersagen am Niederrhein. Binnenschifffahrt: Schiffstechnik, Wasserstraßen, Häfen, Logistik. Nr. 10. S. 38-40
- HEMRI, S., D. LISNIAK, B. KLEIN (2014): Ermittlung probabilistischer Abflussvorhersagen unter Berücksichtigung zensierter Daten. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Jahrgang 58, Heft 2, DOI: 10.5675/HyWa_2014,2_4.
- KLEIN, B., D. MEIBNER, S. HEMRI, D. LISNIAK (2015): Ermittlung der prädiktiven Unsicherheit von hydrologischen Ensemblevorhersagen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1853. DOI: 10.5675/BfG-1853
- KRAHE, P., S. RADEMACHER (2008): Vorhersagesysteme in der gewässerkundlichen Beratung. In: Veranstaltungen 4/2008 „Saisonale Vorhersagesysteme in Meteorologie und Hydrologie“. Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 7-17
- MEIBNER, D., S. RADEMACHER (2010): Die verkehrsbezogene Wasserstandsvorhersage für die Bundeswasserstraße Rhein. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 3(9). 485-491
- MEIBNER, D., B. KLEIN, D. LISNIAK, R. PINZINGER (2014): Probabilistische Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen – Kommunikationsstrategien und Nutzungspotentiale am Beispiel der Binnenschifffahrt. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Jahrgang 58, Heft 2, DOI: 10.5675/HyWa_2014,2_7
- RADEMACHER, S., P. BUREK, M. EBERLE (2004): Niedrigwasser – Vorhersage an Bundeswasserstraßen – Entwicklung und operationeller Betrieb. In: Kleeberg, H.-B. und Koehler, G. (Hrsg.): Niedrigwassermanagement – Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz, Hydrologische Wissenschaften – Fachgemeinschaft der ATV-DVWK.
- STEINEBACH, G. (1999): Using hydrodynamic models in forecast systems for large rivers. Proc. Advances in Hydro-Science and -Engineering, Vol. 3. Holz, K. P., Bechteler, W., Wang, S. S. Y., Kawahara, M. (ed.), Cottbus
- STELLING, G. S., S. P. A. & DUINMEIJER (2003): A staggered conservative scheme for every froude number in rapidly varied shallow water flows. International Journal Numerical Methods In Fluids 43: 1329-1354
- VOGELBACHER, A. (2014): Zuverlässigkeitsaussagen in der Praxis der Hochwasserwarnung und -vorhersage in Bayern. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Jahrgang 58, Heft 2, DOI: 10.5675/HyWa_2014,2_10.
- WERNER, M., J. SCHELLEKENS, P. GIJSBERS, M. VAN DIJK, O. VAN DEN AKKER, K. HEYNERT (2013): The Delft-FEWS flow forecasting system. Environmental Modelling & Software 40 (2013) 65-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.07.010>
- WILKE, K. (1984): Kurzfristige Wasserstands- und Abflussvorhersage am Rhein unter Anwendung ausgewählter mathematischer Verfahren.- Schriftenreihe des DVWK, Heft 65, 254 S. Hamburg und Berlin



Kontakt:

Dennis Meißner

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5183
E-Mail: meissner@bafg.de

1998 – 2003

Studium Bauingenieurwesen an der Leibniz Universität Hannover

seit 2003

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Bundesanstalt für Gewässerkunde

Aktuelle Aufgabenschwerpunkte:

- Weiterentwicklung von Methoden und Modellen zur deterministischen und probabilistischen Wasserstands- und Abflussvorhersage
- Großräumige hydrodynamisch-numerische Abfluss- und Strömungsmodellierung
- Aufbau flussgebietsbezogener Vorhersagesysteme für operationelle Anwendungen
- Analyse der Vorhersagbarkeit und Entwicklung neuer Vorhersageprodukte mit mittelfristigen und saisonalen Vorhersagehorizonten



Kontakt:

Silke Rademacher

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5858
E-Mail: rademacher@bafg.de

1985 – 1992

Studium Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart

1992 – 1994

Dezernentin bei der WSD Nord in Kiel

1994 – 1999

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart

seit 2000

Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Bundesanstalt für Gewässerkunde

- Langjährige Ansprechpartnerin des Bereichs „Vorhersage – Wasserstand, Abfluss, Eis“
- Aufbau flussgebietsbezogener Vorhersagesysteme für operationelle Anwendungen
- Operationelle Erstellung verkehrsbezogener Wasserstandsvorhersage

seit 2018

- Referatsleiterin M1 „Hydrometrie und gewässerkundliche Begutachtung“

Modellierung im Binnenverkehrswasserbau – Routine oder Herausforderung?

Andreas Schmidt

1 Einleitung

Ziel des Binnenverkehrswasserbaus ist es, gewerbliche Schifffahrt auf Flüssen und Kanälen zu ermöglichen. Im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern weist der Verkehrsträger Binnenschifffahrt jedoch die Besonderheit auf, dass sein Transportmedium, die Flüsse und Kanäle, einer Vielzahl von Nutzungsarten unterliegt. Die Anforderungen der Schifffahrt sind dabei im Wesentlichen beschrieben mit Bedingungen, die einen sicheren, leichten und gleichzeitig wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten. Dies setzt neben einer geeigneten Trassierung der Fahrrinne vor allem deren ausreichende Tiefe und Breite voraus. Darüber hinaus erfordern Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs eine weitgehend lagestabile Fahrrinne sowie moderate Fließgeschwindigkeiten. Wie die anderen Verkehrsträger auch ist die Binnenschifffahrt vor allem auf verlässliche, auch infrastrukturpolitisch verlässliche, Randbedingungen angewiesen.

An frei fließenden Flussabschnitten zielen verkehrswasserbaulich initiierte flussregelnde Maßnahmen in erster Linie auf die Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse bei Niedrig- bis Mittelwasser. Dies lässt sich durch Einsatz geeigneter Regelungselemente wie Buhnen und Parallelwerke in Verbindung mit einer Bewirtschaftung des vom Fluss transportierten Geschiebes erreichen, wobei der frei fließende Charakter des Flusses erhalten bleibt.

In staugeregelten Flüssen werden durch den Bau von Staustufen die Wasserstandsverhältnisse aus schifffahrtlicher Sicht verbessert und Voraussetzungen zur Nutzung der Wasserkraft geschaffen. Wesentliche Elemente einer Staustufe sind die abflussregelnde Wehranlage, ggf. ein Wasserkraftwerk, sowie an schiffbaren Flüssen eine Schiffschleuse mit einer oder mehreren Kammern. In wenigen Fällen kommen auch Schiffshebwerke zur Überwindung des Höhenunterschieds zum Einsatz.

Zu den Anlagen an den Bundeswasserstraßen zählen neben 337 Wehranlagen, 326 Schiffschleusen, vier Schiffshebwerken und etwa 1.350 Brücken auch die Ufersicherungen und Sohlbefestigungen (http://www.wsv.de/wasserstrassen/bauwerke_und_anlagen).

Bei Ausbau, Betrieb und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen sind sämtliche Sparten des Verkehrswasserbaus gefragt. Der Neubau einer Schleuse, wie z. B. die derzeit am Elbe-Seitenkanal geplante Sparschleuse Lüneburg, erfordert Expertise u. a. auf den Gebieten Bautechnik (Konstruktion, Statik, Baustoffe, Stahlwasserbau), Geotechnik (Baugrund, Grundwasser), Wasserbau (Füll- und Entleersysteme) und Fahrdynamik (Ein- und Ausfahrbedingungen in den Vorhäfen). In allen diesen Bereichen sind Modellierungen insbesondere in der Planungsphase zentrale und unverzichtbare Untersuchungsmethoden.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als der zentrale verkehrswasserbauliche Berater und Gutachter des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) unterstützt diese in den vorgenannten Disziplinen im Binnen- und Küstenbereich, um sicherzustellen, dass die Wasserstraßen in Deutschland den wachsenden technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen gerecht werden. Um die Qualität ihrer Beratungsleistungen zu erhalten und zu verbessern, betreibt die BAW Forschungs- und Entwicklungsprojekte (FuE) im gesamten Spektrum des Verkehrswasserbaus, auch disziplinenübergreifend.

Dieser Beitrag widmet sich ausschließlich den wasserbaulichen Fragestellungen an den Binnenschifffahrtsstraßen des Bundes mit Schwerpunkt auf der numerischen Modellierung.

2 Aufgabenentwicklung

Vor dem Hintergrund eines seit Jahrzehnten deutlich wachsenden Umweltbewusstseins, das seinen Ausdruck findet in wesentlichen Änderungen der europarechtlichen Rahmenbedingungen und der nationalen Gesetzgebung im Umweltbereich (u. a. FFH-Richtlinie, Wasserrahmenrichtlinie, Wasserhaushaltsgesetz), wird der ökologischen Funktion von Gewässern und ihren Auen eine zunehmend größere Bedeutung beigemessen. Das Bundesprogramm „*Blaues Band Deutschland*“ (BMVI & BMUB 2017), welches die Renaturierung von Flüssen und Auen und die Realisierung eines Biotopverbunds mit Schwerpunkt an den für den Gütertransport unbedeutenden sog. Nebenwasserstraßen zum Ziel hat, trägt dieser Entwicklung Rechnung.

Die Unterhaltung der Bundeswasserstraßen sowie die Planung und die Umsetzung verkehrswasserbaulicher Projekte werden durch diese Entwicklungen maßgeblich geprägt. Dies macht auch der Aufgabenzuwachs deutlich, welcher der WSV und ihren Oberbehörden durch die Zuständigkeit für die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den von der WSV errichteten oder betriebenen Stauanlagen erwachsen ist (WHG 2009). Die Vereinbarkeit von verkehrswasserbaulichen Maßnahmen und schifffahrtlicher Nutzung mit wasserwirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen ist heutzutage eine wesentliche Bedingung des Wasserstraßenbetriebs.

Auch die Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels für die Wasserstraßen und die Schifffahrt sowie zu geeigneten Anpassungsstrategien tragen zu einer deutlichen Aufgabenerweiterung bei. Die BAW untersuchte von März 2009 bis Ende 2013 in dem Ressortforschungsprogramm des BMVI „*Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen*“ (KLIWAS) verkehrswasserbauliche Maßnahmen zur Optimierung der Befahrbarkeit von Wasserstraßen im Binnen- und Küstenbereich für unterschiedliche hydrologische Szenarien. Seit Oktober 2015 ist die BAW am Deutschen Klimadienst (DKD) beteiligt, einem Netzwerk von Behörden und Ämtern, dessen Ziel es ist, regelmäßig und dauerhaft Klimainformationen und Klimadienstleistungen operationell zur Verfügung zu stellen. Auch innerhalb des Expertennetzwerks des BMVI, einem Forschungsverbund von sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des BMVI (<http://www.bmvi-expertennetzwerk.de>), forscht die BAW im Themenfeld 1 (*Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen*) in verschiedenen Arbeitsschwerpunkten zu den Folgen des Klimawandels für Wasserstraßen und Schifffahrt.

Die Binnenschifffahrt sieht sich Herausforderungen gegenüber, die vornehmlich aus verkehrs- und umweltpolitischen sowie technologischen Anforderungen und Entwicklungen erwachsen. Verschärfte EU-Abgasnormen erfordern auch in der Binnenschifffahrt schiffbau-liche, antriebstechnische und betriebliche Innovationen zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs und damit zur Begrenzung der Emissionen. Zu Möglichkeiten der Verminderung von Schiffsemissionen forscht die BAW im Themenfeld 2 (*Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten*) des BMVI-Experten Netzwerks. Wie für andere Wirtschaftsbereiche ist auch für die Binnenschifffahrt die „Digitalisierung und Automatisierung“ eine der wesentlichen Herausforderungen.

Mit diesen Entwicklungen einerseits, dem wachsenden Verständnis der wechselwirkenden hydraulischen, morphodynamischen und ökologischen Prozesse, den rasanten Entwicklungen in der Messtechnik und bei den für die Untersuchungen zur Verfügung stehenden Instrumenten andererseits, haben sich Aufgabenumfang und Komplexität der Untersuchungen erheblich erhöht. Gefordert sind heute eine wesentlich größere Untersuchungstiefe und genauere Auswirkungsprognosen in verschiedenen Zeit- und Raumskalen mit dem Anspruch einer ganzheitlichen Betrachtung. Hieraus erwachsen naturgemäß fachliche und somit auch methodische Herausforderungen.

3 Routine oder Herausforderung

In ihrer Rolle als Berater und Gutachter wird die BAW von der WSV beauftragt, wenn die Aufgaben aufgrund ihrer Komplexität, ihres wissenschaftlichen Anspruchs, ihrer hohen verkehrspolitischen oder ihrer hohen rechtlichen Bedeutung die interdisziplinäre Fachkompetenz der BAW erfordern. Aufgaben, für die dies nicht zutrifft, werden von der WSV eigenständig oder mittels partieller oder vollständiger Vergabe bearbeitet, je nach Bedarf auch unter fachlicher Beteiligung der BAW. Mit Routineaufgaben ohne fachtechnische Besonderheiten ist die BAW somit nicht befasst.

Dennoch lohnt es, sich Klarheit über den Begriff *Routine* auch im wissenschaftlichen Kontext zu verschaffen. Die Ambivalenz dieses Begriffs zeigt sich daran, dass „*in einer Tätigkeit Routine erlangen*“ gemeinhin als positiv bewertet wird, wohingegen die meisten mit *Routinearbeiten* Langeweile verbinden und diese wohl eher als unbefriedigend und wenig inspirierend und motivierend empfinden. Eine Sache „*routiniert zu Ende bringen*“ hingegen wird sicherlich in jedem Kontext begrüßt, kündigt aber auch unverkennbar von zumindest phasenweiser Unterforderung.

Routine wird durch Erfahrungen in der Anwendung erworben und setzt die Fähigkeit zur wertenden Interpretation einzelner Erfahrungen, deren kritische Einordnung in einen Erkenntniszusammenhang und das Vermögen zur produktiven, problemangemessenen Umsetzung des Erfahrungswissens voraus. Je vielschichtiger die einzelnen Erfahrungen sind, je mehr man mit Unerwartetem und Widersprüchlichem konfrontiert wird, desto umfassender und wertvoller das Erfahrungswissen, der Erfahrungsschatz.

Obzwar Routine im Arbeitsalltag, auch im wissenschaftlichen, zu einem bestimmten Maß erforderlich ist, birgt diese jedoch auch ein nicht zu unterschätzendes Gefährdungspotenzial. Mit zunehmender Routine wächst auch die Gefahr, individuelle Besonderheiten, Abweichungen vom Erwarteten, Änderungen der Bedeutungszusammenhänge und mögliche Widersprü-

che nicht als solche wahrzunehmen. Missinterpretationen und Fehldeutungen aufgrund mentalen Tunnelblicks sind in der Folge umso wahrscheinlicher. Der Blick auf das zu Erwartende beeinträchtigt allzu leicht die Wahrnehmung des davon Abweichenden.

Fachliche Herausforderungen, seien sie aufgaben- oder erwartungsgetrieben (neu, detaillierter, komplexer, disziplinenübergreifend etc.) oder durch zunehmende instrumentelle Möglichkeiten bedingt, werden natürlich, je stärker man sich diesen widmet, im Maße ihrer fachlichen Durchdringung und methodischen „Beherrschung“ zusehends zu Alltags- sprich Routineaufgaben. Dem Routineerwerb geht dabei voraus, dass vormals nicht oder nur unvollständig verstandene Prozesse und Phänomene durch die Auseinandersetzung im Kontext der (versuchten) Aufgabenbewältigung zunehmend verstanden werden, und dass Voraussetzungen für eine erfolgreiche Bewältigung der spezifisch herausfordernden Aspekte im Bearbeitungsalltag, oftmals auch mittels Umsetzung innovativer Ideen, geschaffen werden. Das Mehr an wissenschaftlichem als auch operativem Wissen dringt somit in den Arbeitsalltag ein – zunächst bei den unmittelbar Beteiligten, über Wissensvermittlung – hoffentlich – auch bei den nicht unmittelbar an der Wissensmehrung Beteiligten.

Routineerwerb setzt dabei voraus, dass die Bewältigung einer neuen fachlichen, methodischen oder operativen Herausforderung nicht einem singulären Erfordernis geschuldet ist, sondern aufgrund regelmäßigen Bedarfs sich die Chance eröffnet, diese auf den verschiedenen Ebenen kontextabhängig einzuüben.

4 Modellierung im Binnenverkehrswasserbau

4.1 Modellierungsinstrumente

Modellbasierte Untersuchungen zu hydraulischen und morphologischen Fragestellungen an den Bundeswasserstraßen stellen aufgrund ihrer oftmals standortspezifisch unterschiedlichen Randbedingungen und der hohen Komplexität der zugrundeliegenden hydro- und morphodynamischen Prozesse weiterhin große technische Herausforderungen dar.

Die Wahl einer geeigneten Methode ist dabei von zentraler Bedeutung für eine erfolgreiche Bearbeitung der anstehenden Frage. Angesichts der vielen Aspekte, die die Entscheidung beeinflussen, ist dies keineswegs eine triviale Aufgabe. Neben grundlegenden Fragen – z. B.: Gibt es ein ausreichendes Verständnis der Physik des zu modellierenden Prozesses? Welche Ergebnisse werden erwartet, in welchem Umfang und in welchem Detaillierungsgrad? Sind die relevanten Phänomene skalierbar? Welche Dimensionalität ist zu beachten und welche Skalen sind für das Modell relevant? Sind Eingabedaten in der erforderlichen Qualität verfügbar? – stellen sich auch zahlreiche Fragen praktischer Art, z. B.: Was wird die Untersuchung kosten? Ist die notwendige Anzahl von Varianten in vertretbarer Zeit erreichbar? Steht genügend Platz und Laborausrüstung für ein gegenständliches Modell zur Verfügung? Muss das Modell langfristig vorgehalten werden?

Die Untersuchungsmethoden, die in der Regel zur Auswahl stehen, gegenständliche und numerische Modellierung, haben jeweils ihre eigenen Stärken und Schwächen. Neben dem unbestreitbaren Vorzug der Anschaulichkeit liegt der Hauptvorteil der gegenständlichen Modellierung – die Berücksichtigung der Modellgesetze vorausgesetzt – darin, dass grundlegende physikalische Prozesse (z. B. Turbulenz), die derzeit mathematisch oder numerisch nur

schwer oder gar nicht beschrieben werden können, inhärenter Teil des Modells sind. Von Nachteil sind sicherlich der Platzbedarf und die Anforderungen an die Messtechnik, der oft hohe Zeit- und Kostenaufwand insbesondere für Modellaufbau und -umbau, die daraus resultierende mangelnde Flexibilität hinsichtlich der Variantenzahl und mögliche Skalierungseffekte.

Numerische Modellierung hingegen ermöglicht größere Untersuchungsgebiete und erzielt skalenunabhängige Ergebnisse hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, die eine entsprechend detaillierte Visualisierung aller Strömungsgrößen ermöglichen. Unterschiedliche Varianten können mit wenig Aufwand und somit in großer Anzahl untersucht und Modelle langfristig vorgehalten werden. Abgesehen von der Tatsache, dass jeder der verschiedenen numerischen Ansätze seine eigenen Tücken hat, besteht der Hauptnachteil der numerischen Modellierung darin, dass oft grundlegende physikalische Prozesse, wie beispielsweise der Geschiebetransport, immer noch nicht einer befriedigenden mathematisch-numerischen Beschreibung zugänglich sind, da die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse noch nicht hinreichend verstanden sind. Darüber hinaus sind den Modellierungswünschen durch die auch heute noch begrenzten Rechenressourcen allzu oft enge Grenzen gesetzt.

Es ist daher naheliegend, eine kombinierte Methodik zu verwenden, um die Nachteile bei der Anwendung nur einer Methode durch die zusätzliche Anwendung einer anderen Methode zu kompensieren. Die Kombination zweier komplementärer Methoden, die im Wasserbau als „Hybride Modellierung“ bezeichnet wird, hat zudem den Vorteil, dass die beiden Methoden sich gegenseitig im Rahmen des Kalibrierungsprozesses (z. B. für Bereiche, in denen keine Messdaten für die Kalibrierung zur Verfügung stehen) qualitätssichernd unterstützen und zur Ergebnisplausibilisierung genutzt werden können. Darüber hinaus kann ein kombinierter Methodeneinsatz zu einem tieferen Verständnis des Systemverhaltens beitragen und wechselseitige methodische Entwicklungen ermöglichen. Nicht zuletzt dienen numerische Voruntersuchungen auch der gezielten Planung eines gegenständlichen Modells.

Unabhängig von den unbestreitbaren Vorteilen, die eine hybride Modellierung bieten kann, ist es wichtig, sich über die fachliche Notwendigkeit eines kombinierten Methodeneinsatzes klar zu werden und abzuwägen, ob der erhoffte Erkenntnisgewinn den Mehraufwand rechtfertigt. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob die vorhandenen Ressourcen (Personal, Zeit) gegeben sind, um auftretenden Widersprüchen in den methodenspezifischen Ergebnissen nachzugehen, was in der Regel mit höherem Modellierungs-, Analyse- und Interpretationsaufwand verbunden ist. Mit Blick auf den Aufwand fällt die Entscheidung, ein benötigtes gegenständliches Modell numerisch zu „begleiten“ auch angesichts der damit verbundenen Möglichkeit, das Untersuchungsgebiet (gegenständliches Ausschnittsmodell) zu vergrößern und die Untersuchungsergebnisse auf diese Weise abzusichern, sicherlich leichter als im umgekehrten Fall.

Im Hinblick auf die kommenden Jahrzehnte ist zumindest für die BAW zu erkennen, dass gegenständliche Modelle in erster Linie dort eingesetzt werden, wo physikalische Phänomene vorherrschen oder zumindest nicht zu vernachlässigen sind, die sich einer befriedigenden numerischen Modellierung noch entziehen. Dies gilt insbesondere für den Geschiebetransport, für Mehrphasenströmungen (Wasser-Feststoff-, Wasser-Luft-Gemische) sowie für Untersuchungen, die die Simulation komplexer Bewegungen (z. B. Schwingungsphänomene, Bewegung fester Körper in der Strömung) erfordern. Für wichtige und anspruchsvolle Projekte, für die entsprechende Ressourcen zur Verfügung stehen, wird die hybride Modellierung für die wasserbauliche Abteilung der BAW zu einem qualitätssichernden Standard.

In der BAW wird derzeit ein Leitfaden erstellt, welcher anhand einer strukturierten, allgemeinverständlichen Darstellung von *Arbeits- und Entscheidungsprozessen im Rahmen der mehrdimensionalen hydro- und morphodynamischen Modellierung* den Ablauf eines flussbaulichen Modellierungsprojekts von der konzeptionellen Planung bis zum Projektabschluss beschreibt. Dieser Leitfaden soll die mit Modellierungsaufgaben betrauten Projektbearbeiter in der BAW bei den zahlreichen anspruchsvollen Fragen und Entscheidungen zum Methodeinsatz unterstützen und es Interessierten ermöglichen, die gewählten Konzepte, Methoden und getroffenen Entscheidungen auch ohne Erfahrungswissen auf dem Gebiet der mehrdimensionalen Modellierung nachvollziehen zu können (BAW 2018).

4.2 Modellsimulationen für verkehrswasserbauliche Aufgaben in der BAW

4.2.1 Flussbau

Im flussbaulichen Bereich werden in der BAW zur Prognose der hydraulischen und morphologischen Auswirkungen verkehrswasserbaulicher Systemanpassungen numerische Simulationsmodelle mit je nach Fragestellung unterschiedlicher Dimensionalität eingesetzt.

Eindimensionale Strömungsmodelle werden für großräumige hydraulische Fragestellungen, z. B. für hydraulische Streckenanalysen und für Analysen der Wasserspiegellinien und Festlegung gleichwertiger Wasserspiegel (GIW) sowie in Flussabschnitten mit in der Regel vernachlässigbarer morphologischer Aktivität eingesetzt.

Eindimensionale Feststofftransportmodelle, deren Einsatzbereich infolge ihrer hydrodynamischen Grundgleichungen auf langfristige und großräumige Tendenzaussagen beschränkt ist, werden für Simulationen von Strecken bis zu mehreren 100 Kilometern und Simulationszeiträumen von vielen Jahrzehnten eingesetzt. Auch wegen ihres geringen Bedarfs an Rechenressourcen sind sie in der BAW weiterhin wichtige Werkzeuge u. a. zur Prognose der langfristigen Sohlentwicklung, zur Planung und Erfolgskontrolle der Sedimentbewirtschaftung und für großräumige Aussagen zu klimabedingten Entwicklungen.

Tiefengemittelte zweidimensionale Strömungsmodelle kommen in der Auftragsbearbeitung derzeit auf Strecken bis etwa 200 km zum Einsatz. Mit einem 2D-HN-Modell des Niederrheins (Ausdehnung 198 km, 8,2 Mio. Elemente, zeitliche Diskretisierung 1 Sekunde, kleinste Kantenlänge 2-3 m) beispielsweise werden auf einem Hochleistungsrechner in 4 Stunden Rechenzeit 2 Echtzeittage simuliert.

Zweidimensionale Feststofftransportmodelle werden v. a. zur Prognose der Sohlentwicklung derzeit im mesoskaligen Bereich eingesetzt. Mit einem 23 km langen Donaumodell mit einer Elementanzahl von 670.000 (Kantenlängen: Flussschlauch 2-5 Meter, Vorlandbereich 10-15 m), 20 Kornfraktionen und einer zeitlichen Diskretisierung von 2 Sekunden sind derzeit auf einem Hochleistungsrechner Simulationen von 10 Jahren Naturabflussganglinie innerhalb einer Rechenzeit von etwa zwei Tagen möglich.

Dreidimensionale Strömungs- und Feststofftransportmodelle kommen bei ausgeprägt dreidimensionalen Phänomenen z. B. in engen Krümmungen oder bei kleinräumig hoher Tiefenvarianz zum Einsatz. Beide Phänomene liegen z. B. in der Gebirgsstrecke des Mittellheins vor. Im Bereich des Jungferngrundes wird in der BAW zurzeit ein 3D-HN-Modell im Rahmen eines hybriden Modellansatzes parallel zum Einsatz eines gegenständlichen Modells betrieben. Eine Modellstrecke von ca. 8 km wird durch insgesamt 2,64 Mio. Elemente

(10 Schichten, mittlere horizontale Elementgröße 4,5 m) abgebildet. Die Rechenzeiten betragen bei einer Zeitschrittweite von 0,1 s etwa 10 Stunden für die Abbildung einer Echtzeit von 5 Stunden. Darüber hinaus werden dreidimensionale Modelle zur Validierung der numerischen Verfahren anhand von Ergebnissen aus Labormodellen eingesetzt, vor allem im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (SCHMIDT et al. 2014).

Einen Überblick über die im Arbeitsalltag der BAW eingesetzten morphodynamischen numerischen Simulationsmodelle geben BRUDY-ZIPPELIUS & SCHMIDT (2014).

Auch wenn die numerischen Simulationsmodelle infolge der in den zurückliegenden Jahren kontinuierlich gestiegenen Rechenleistung und durch gezielte Weiterentwicklungen sich zu leistungsstarken und für die Auftragsbearbeitung unverzichtbaren Werkzeugen entwickelt haben, besteht weiterhin erheblicher Entwicklungsbedarf. Beispielsweise gilt es, die rechnerische Effizienz der mehrdimensionalen numerischen Verfahren noch erheblich zu steigern, um Langfristsimulationen über viele Dekaden innerhalb tolerierbarer Rechenzeiten durchführen zu können. Zentrale Prozesse wie der Transportbeginn, der Transport auf fester Sohle oder der Sedimenttransport in Form von Dünen sind noch nicht hinreichend verstanden und werden daher immer noch mittels empirischer Ansätze, und daher immer mit Einschränkungen des Gültigkeitsbereichs und der Prognosegüte der Modellierung, beschrieben. Hierzu sind weitere Untersuchungen zur Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte erforderlich. Auch gilt es, die vertikale Sortierung des Sohlaufbaus, ein wesentliches Element für eine zuverlässige Prognose der Sohlentwicklung, durch verbesserte Mehrschichtmodelle zu berücksichtigen. Nicht zuletzt besteht großer Bedarf, die Unsicherheiten in den Modellergebnissen mit Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse zu quantifizieren, um die Güte der Auswirkungsprognosen morphodynamischer Modellierungen besser bewerten zu können.

An den hier beispielhaft genannten Herausforderungen wird, wie an anderen auch, im Rahmen von FuE-Vorhaben zusammen mit wissenschaftlichen Kooperationspartnern in der BAW gearbeitet (CASULLI & STELLING 2011, CLEES et al. 2012, KOPMANN & MERKEL 2012, GOLL et al. 2013, MERKEL & KOPMANN 2014).

Neben den Herausforderungen, die sich in den Bereichen *Prozessverständnis* einerseits und *Modellierungsmethoden und -verfahren* andererseits stellen, ist festzuhalten, dass die Herausforderungen im flussbaulichen Bereich auch ganz wesentlich aus der *Aufgabenerweiterung* durch die stärkere Einbeziehung wasserwirtschaftlicher und ökologischer Aspekte resultieren sowie der Tatsache geschuldet sind, dass wasserbauliche Vorhaben immer öfter mit einer Fülle an Erwartungen hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen konfrontiert werden, welche zuweilen nicht oder nicht in dem gewünschten Ausmaß erfüllbar sind (HUBER & SCHMIDT 2016). Eine mitunter naive Erwartungshaltung an die Prognosefähigkeit numerischer Verfahren, insbesondere im Falle hoch variabler morphodynamischer Prozesse, ist dabei eine Herausforderung ganz eigener Art.

4.2.2 Ökologische Durchgängigkeit

Bei den Aufgaben zur ökologischen Durchgängigkeit spielen hochaufgelöste dreidimensionale Strömungsmodellierungen zur Untersuchung von Auffindbarkeit und Passierbarkeit von Fischauftiegsanlagen eine zentrale Rolle. Entsprechende bauwerksbezogene oder das Bauwerksnahfeld betreffende Modellierungen, wie z. B. der Beckenhydraulik oder auch von Sonderbauwerken (z. B. Verteilerbecken), setzen Erfahrungswissen auf dem Gebiet der

Turbulenzmodellierung als auch hinreichend große Rechenressourcen voraus. In der BAW sind diese dreidimensionalen Strömungsmodellierungen eine inzwischen beherrschte Standardaufgabe. Im Gegensatz hierzu stellt die Modellierung des hochturbulenten Unterwassers einer Wasserkraftanlage zur hydraulischen Bewertung der Einstiegssituation (Leitströmung der Fischaufstiegsanlage in Konkurrenz zur Kraftwerksabströmung) infolge einer turbinenseitig unbekannten und kaum messbaren Randbedingung (Turbinenabströmung, Strömungsverteilung und Turbulenz am Austritt aus dem Saugschlauch) weiterhin eine Herausforderung dar. Entwicklungen mit dem Ziel einer verbesserten Modellierung dieser Strömungsvorgänge stellen daher einen Schwerpunkt der Arbeiten in der BAW dar (GISEN et al. 2017).

Die ungeheure Menge an zu untersuchenden Stauanlagen mit oftmals sehr individuellen Randbedingungen und die vielschichtigen, häufig sehr kontrovers verlaufenden Abstimmungsprozesse (Bund, Land, Kraftwerksbetreiber) stellen für sich schon eine gewaltige Herausforderung dar. Zudem bestehen noch erhebliche Wissenslücken auf dem Gebiet der Ethohydraulik, vor allem hinsichtlich des hydraulischen Einflusses auf das Fischverhalten an Staustufen und die Habitaterschließung in Flüssen. Ganz besonders gilt das für die speziellen geometrischen und hydraulischen Randbedingungen an den großen Stauanlagen der Bundeswasserstraßen. Wissenschaftlich abgesicherte Grundlagen für die Bemessung von Fischaufstiegshilfen und für Lösungen für einen gefahrlosen Fischabstieg stellen wesentliche Ziele für die nächsten Jahre dar. Mit Blick auf die Kosten und die Umsetzungszeiten gilt es, die Möglichkeiten für standardisierte Bauweisen aufzuzeigen. Eine herausfordernde Forschungsaufgabe in diesem Arbeitsbereich stellt auch die Entwicklung numerischer Methoden dar, die es ermöglichen, das Fischverhalten in unterschiedlichen hydraulischen Umgebungsbedingungen zu simulieren, z. B. auf der Basis einer individuenbasierten Modellierung (sog. agentenbasierte Modelle) (GISEN 2018). Ein derartiges Modell würde es ermöglichen, in der Planungsphase einer Fischaufstiegsanlage eine große Anzahl unterschiedlicher Varianten vergleichsweise aufwandsarm bewerten zu können.

4.2.3 Hydraulik der Wasserbauwerke

Bei den Untersuchungen zur Hydraulik der Wasserbauwerke spielen hochaufgelöste dreidimensionale Strömungsmodellierungen, wie bereits bei den Aufgaben zur ökologischen Durchgängigkeit angeführt, eine zentrale Rolle. Die beim Prozess einer Schleusenfüllung beispielsweise auftretenden hydraulischen Fragen – mit welcher Geschwindigkeit sich die Schleusenkammer füllen lässt, wie entsprechende Schützfahrpläne ausgelegt sein müssen etc. – lassen sich auf der Grundlage entsprechender Modellierungserfahrung heutzutage zuverlässig beantworten (THORENZ 2010). Dies trifft ebenso auf Fragen zur Leistungsfähigkeit von Wehranlagen zu (GERSTNER et al. 2014).

Herausforderungen für eine numerische Simulation hingegen stellen sich bei Prozessen mit Fluid-Struktur-Wechselwirkung, bei der Bewegung fester Körper in der Strömung sowie bei Fragestellungen, bei denen Mehrphasenströmungen eine Rolle spielen.

Die Simulation von Schwingungsphänomenen beispielsweise, wie sie bei über- oder unterströmten verformbaren oder elastisch gelagerten Körpern, z. B. bei Wehrverschlüssen (Stahlwasserbau- oder Schlauchwehrverschlüsse), Verschlussdichtungen oder Füllschützen, mit hohem Schädigungspotenzial auftreten können, erfordert eine Kopplung von strömungs- und strukturmechanischen Ansätzen. Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungs-

vorhabens, in welchem Ursachen, Auswirkungen und Abhilfemaßnahmen bei strömungs-induzierten Schwingungen im Stahlwasserbau untersucht werden, ist es eines der Ziele, typische Schwingungsphänomene mit numerischen Verfahren zu simulieren (GÖBEL et al. 2017).

Zu den ausgesprochen anspruchsvollen Aufgaben gehört die numerische Simulation der Bewegung fester Körper in der Strömung. Dies betrifft sowohl die Modellierung eines fahrenden Schiffs als auch die Modellierung der Schiffsbewegungen bei der Füllung einer Schleuse (THORENZ et al. 2017) bzw. die Bestimmung der auf das bewegte Schiff wirkenden hydrodynamischen Kräfte. Zur erfolgreichen Modellierung von Schiffsbewegungen in einem gitternetz-basierten Verfahren gilt es, die Möglichkeiten und Grenzen adaptiver oder bewegter Gitter auszuloten. Der Entwicklung entsprechender Verfahrensweisen widmet sich derzeit ein FuE-Vorhaben in der BAW.

Lufteintrag und Möglichkeiten, diesen zu vermeiden, sind seit jeher im Wasserbau relevante Themen. Eine physikalisch stimmige numerische Simulation von Luft-Wasser-Strömungen bedarf jedoch noch intensiver Forschungsanstrengungen (SCHULZE et al. 2014).

4.2.4 Fahrdynamik

Bei Untersuchungen zur Fahrdynamik von Binnenschiffen werden Simulationsverfahren für Befahrbarkeitsanalysen und zur Dimensionierung und Optimierung der Fahrrinnen entsprechend des Verkehrsflächen- und Tiefenbedarfs der fahrenden Schiffe eingesetzt. Darüber hinaus werden schiffserzeugte Belastungen (verdrängungs- und antriebsbedingte Strömungen und Wellen) auf Ufer, Gewässersohle und Wasserbauwerke sowie schiffsdynamische Effekte (z. B. Squat und Trimm) simuliert. Bei den Untersuchungen der BAW im Binnenbereich kommen verschiedene semi-empirische und mathematisch-numerische Verfahren, im Wesentlichen ein zweidimensionales fahrdynamisches Verfahren (Fast-Time-Simulator FaRAO) sowie ein Schiffsführungssimulator, im Rahmen der Auftragsbearbeitung zum Einsatz.

Die Wechselwirkung der Schiffsbewegung mit der schiffsinduzierten Strömung in fließenden oder stehenden Gewässern, die in lateral und vertikal begrenzten Querschnitten die Kräfte auf das Schiff maßgeblich bestimmt, wird in der fahrdynamischen Modellierung von Binnenschiffen im Allgemeinen nur parametrisiert berücksichtigt. Dies trifft sowohl auf das Verfahren FaRAO als auch auf den Schiffsführungssimulator zu. Eine zuverlässige fahrdynamische Modellierung von Schiffsbewegungen erfordert jedoch die Ermittlung der Kräfte auf das Unterwasserschiff. Daher ist eine Modellierung der schiffsinduzierten Strömungen eine zwingende Voraussetzung, um die derzeit verwendeten semi-empirischen Berechnungsansätze zur Ermittlung der Strömungskräfte durch physikalisch basierte, parameterfreie Simulationen zu verbessern. Damit wird es künftig möglich sein, aufwendige Naturversuche, die immer nur für einen Schiffstyp mit einem bestimmten Beladungszustand gültig sind, durch Simulationen zu ersetzen.

Für den Einsatz des 2009 beschafften kommerziellen Schiffsführungssimulators, der für die Ausbildung des nautischen Personals auf Seeschiffen konzipiert war, wurde der vorhandene Rechenkern um Methoden zur Berechnung schiffsinduzierter Wellen und zur Vorhersage der Bewegung von Binnenschiffen in extrem flachem Wasser unter Berücksichtigung von Strömungsfeldern erweitert und die Eigenschaften der Heck- und Bugruderanlagen an die Technik, wie sie auf Binnenschiffen eingesetzt wird, angepasst. Weitere Entwicklungen, wie z. B. die Erweiterung des Kollisionsmodells, sind in Bearbeitung.

Der Simulator wird im Rahmen von WSV-Projekten zur Bearbeitung verkehrswasserbau-licher Fragestellungen eingesetzt. Dabei wird das Schiff von einem Schiffsführer mit Streckenkenntnis nach Sicht durch die Untersuchungsstrecke gesteuert. Dem Schiffsführer steht ein nachgebildeter Steuerstand mit originalen Bedienelementen eines Binnenschiffes und Außensichtdarstellung mittels zahlreicher Monitore zur Verfügung. Die Fahrten mit Schiffsführer weisen gegenüber automatisierten, reglergesteuerten Simulationsfahrten den Vorteil auf, dass bei ihnen die vom jeweiligen Schiffsführer abhängigen Anteile (human factor) wie Streckenerfahrung, Reaktionszeiten, Verhalten unter Stress etc. in das Simulationsergebnis und damit die Streckenbewertung einfließen. Vorbereitende fahrdynamische Untersuchungen können in diesem Kontext mit dem fahrdynamischen Verfahren FaRAO erfolgen mit dem Ziel, eine Vorzugsvariante im Hinblick auf eine sichere und leichte Befahrbarkeit zu entwickeln und damit den Bearbeitungsaufwand mit dem Schiffsführungssimulator zu minimieren.

Über die Weiterentwicklung der fahrdynamischen Modellverfahren hinaus stellen sich große Herausforderungen in den Bereichen „Umweltverträgliche Schifffahrt“ sowie „Digitalisierung und Automatisierung“. Zu Ersterem forscht die BAW im Themenfeld 2 (*Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten*) des BMVI-Expertennetzwerks bezüglich betrieblicher und technischer Optimierungen zur Verminderung der Emissionen. In Bezug auf Digitalisierung und Automatisierung besteht großer Bedarf, die methodischen Voraussetzungen für einen teilautonomen Betrieb von Binnenschiffen zu analysieren, die Nutzbarkeit der notwendigen Datenquellen zu verbessern sowie Konzepte zur automatisierten Datenverarbeitung innerhalb der gesamten Prozesskette zu entwickeln. Ein durch Assistenzsysteme unterstützter teilautonomer Betrieb von Binnenschiffen führt nicht nur zu einer Effizienzsteigerung des Gütertransports; mit der Einsparung von Betriebskosten durch eine optimierte Ausnutzung der Wassertiefen und der Möglichkeit einer ressourcenschonenden Fahrweise werden auch die Emissionen an Treibhausgasen, Stickoxiden, Feinstaub etc. vermindert. Zudem werden durch die Berücksichtigung der aktuellen Verkehrslage Kollisionsrisiken minimiert und ganz allgemein die Sicherheit des Schiffsverkehrs, insbesondere bei einer Begegnung von mehreren Fahrzeugen im Bereich von Engstellen und in kurvenreichen Flussabschnitten, erhöht (SCHMIDT 2017). Die BAW beabsichtigt, sich an der Entwicklung und Erprobung von Fahrerassistenzsystemen zu beteiligen (SCHRÖDER 2017). In einem derzeit in der Antragsphase befindlichen Forschungsprojekt zur Entwicklung eines Assistenzsystems für die Automatisierung der Schleusenein- und -ausfahrt soll das Regelungssystem in der Entwicklungsphase kontinuierlich auf dem Binnenschiffsführungssimulator der BAW auf Praxistauglichkeit und Zuverlässigkeit getestet werden. Das Forschungsprojekt baut auf Ergebnisse des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekts LAESSI (Leit- und Assistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit der Schifffahrt auf Inlandwasserstraßen) auf, in welchem verschiedene Schiffsführerassistenten (u. a. Brückenanfahrwarnung, Bahnführungsassistent) entwickelt wurden (SANDLER et al. 2017).

5 Schlussbemerkung

Für die BAW ist es, wie für Akteure in anderen Bereichen auch, von zentraler Bedeutung, dass Herausforderungen rechtzeitig als solche erkannt werden. Neben einer hinreichenden Sensitivität für sich abzeichnende Entwicklungen setzt dies zuallererst den Willen und das Vermögen voraus, Entwicklungsprozesse mitzugestalten. Nur so kann auf die Entwicklungsrichtung und das Entwicklungstempo im Sinne der eigenen Überzeugungen und Ziele Ein-

fluss genommen werden. Dabei gilt es, die Bedeutung unterschiedlicher Entwicklungen einzuschätzen, diese kontextabhängig einzuordnen und sich über deren Tragweite und Dynamik und die mit ihnen verbundenen Veränderungsprozesse Klarheit zu verschaffen, insbesondere in Bezug auf das fachnahe Umfeld, das eigene Fachgebiet und die eigene Entwicklungsstrategie. Die strategische Ausrichtung hat diesen Überlegungen durch entsprechende Zielsetzungen und die für die Zielerreichung notwendigen Weichenstellungen Rechnung zu tragen. In der BAW ist dies, auch aufgrund ihrer weitreichenden fachwissenschaftlichen Vernetzung auf nationaler und internationaler Ebene, gewährleistet.

Werden bedeutsame Entwicklungen nicht als Herausforderung erkannt, werden sie meist als Routine verkannt. Dabei ist mit Blick auf den weitverbreiteten Einsatz numerischer Modelle nicht zu übersehen, dass die Einordnung sehr anspruchsvoller Problemstellungen als Routineaufgaben und damit einhergehend eine Bearbeitung auf einem der Komplexität nicht angemessenen Niveau mitunter einer fahrlässig unbekümmerten Haltung numerischen Simulationswerkzeugen gegenüber geschuldet ist oder aber bewusst wider besseren Wissens praktiziert wird – sei es aus ökonomischen Gründen, mangels notwendiger Expertise oder aus beiderlei Gründen. Die fortgeschrittenen Möglichkeiten zur vergleichsweise unaufwendigen Erzeugung beeindruckender Ergebnisvisualisierungen kommen dem entgegen.

Die BAW unternimmt erhebliche Anstrengungen zur Weiterentwicklung ihrer Methoden, um die an sie gestellten Aufgaben auf dem jeweils aktuellen Stand der Wissenschaft zu bearbeiten. Die genannte hybride Modellierung, die systematischen Grundsatzuntersuchungen im Rahmen von FuE-Projekten zu komplexen bauwerksbeeinflussten hydro- und morphodynamischen Prozessen als auch die zahlreichen wissenschaftlichen Entwicklungskooperationen verdeutlichen, dass sich die Auftragsbearbeitung im Arbeitsalltag der BAW auf eine exzellente wissenschaftliche und methodisch-instrumentelle Grundlage abstützen kann. Valide Ergebnisse und gerichts feste Gutachten setzen dies, wie einschlägige Erfahrungen der BAW belegen, zwingend voraus.

Die Praxis der Aufgabenbearbeitung in der BAW zeichnet sich in aller Regel durch eine Mischung aus Routineanteilen, insbesondere auf der instrumentellen Seite, und Anteilen, die innovative Lösungen erfordern, aus. Eine Ausgewogenheit dieser Anteile kommt der Bearbeitung in vielerlei Hinsicht zugute und entspricht dem anwendungsorientierten Charakter der BAW als Ressortforschungseinrichtung.

Danksagung

Der Autor dankt Nils Peter Huber für seine wertvollen Diskussionsbeiträge.

Literatur

- BAW – Bundesanstalt für Wasserbau (2018): Leitfaden „Mehrdimensionale hydro- und morphodynamische numerische Modellierung im Flussbau“. Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, April 2018 (unveröff.)
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) & BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2017): Bundesprogramm Blaues Band Deutschland. Eine Zukunftsperspektive für die Wasserstraßen – beschlossen vom Bundeskabinett am 1. Februar 2017

- BMVI-EXPERTENNETZWERK: <https://www.bmvi-expertennetzwerk.de> (aufgerufen am 20.04.2018)
- BRUDY-ZIPPELIUS, T., A. SCHMIDT (2014): Einsatz morphodynamischer Simulationsmodelle an Bundeswasserstraßen – Möglichkeiten und Grenzen. Tagungsband zum BAW-Kolloquium „Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau“ am 26. November 2014 in Karlsruhe
- CASULLI, V., G. S. STELLING (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. Vol. 67, Issue 4, pages 441-449
- CLEES, T., I. NIKITIN, L. NIKITINA, R. KOPMANN (2012): Reliability analysis of river bed simulation models. EngOpt 2012 - 3rd International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 01-05 July 2012
- Deutscher Klimadienst (DKD):
http://www.deutschesklimaportal.de/DE/Themen/4_DKD/DKD.html (aufgerufen am 20.04.2018).
- EU: Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen. (FFH-Richtlinie)
- EU: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327/1, 22.12.2000. (Wasserrahmenrichtlinie)
- GERSTNER, N., F. BELZNER, C. THORENZ (2014): Simulation of Flood Scenarios with Combined 2D/3D Numerical Models, In: Proc. ICHE 2014 - 11th International Conference on Hydroscience & Engineering, Hamburg, ISBN 978-3-939230-32-8
- GISEN D. C., R. B. WEICHERT, J. M. NESTLER (2017): Optimizing attraction flow for upstream fish passage at a hydropower dam employing 3D Detached-Eddy Simulation. *Ecological Engineering*, Volume 100, March 2017, pages 344-353
- GISEN, D. C. (2018): Modeling upstream fish migration in small-scale using the Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). Dissertation der Universität der Bundeswehr München, Veröffentlichung in Vorbereitung.
- GÖBEL, G., M. GEBHARDT, W. METZ, M. DEUTSCHER (2017): Numerische Modellierung zur Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau. Tagungsband zum BAW-Kolloquium „Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschiff-fahrtsstraßen“ am 26./27. Oktober 2017 in Karlsruhe
- GOLL, A., R. KOPMANN, C. VILLARET (2013): Numerical Modelling of flumes with moving dunes – TELEMAC3D and Sisyphe. *Proceedings of Marine and River Dune Dynamics – MARID IV*, April 2013, Bruges, Belgium. VLIZ Special Publication 65
- HUBER, N. P., A. SCHMIDT (2016): Ökologie und Verkehrswasserbau – Anmerkungen zu einer spannungsreichen Beziehung. Tagungsband zum Kolloquium des Leichtweiß-Institutes der TU Braunschweig „Wasserrahmenrichtlinie – Bedeutung der Morphodynamik für den guten ökologischen Zustand“, Oktober 2016, S.66-72
- KLIWAS: <http://www.kliwas.de> (aufgerufen am 20.04.2018)
- KOPMANN, R., U. H. MERKEL (2012): Using Reliability Analysis in Morphodynamic Simulation with TELEMAC-2D / SISYPHE. XIXth Telemac-Mascaret User Conference, Oxford, UK, October 18-19, (<https://hdl.handle.net/20.500.11970/100811>)

- KOPMANN, R., A. SCHMIDT (2010): Comparison of different reliability analysis methods for a 2D morphodynamic numerical model of River Danube. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics "River Flow 2010", 8.-10. Sept. 2010 in Braunschweig, S. 1615-1620
- MERKEL, U. H., R. KOPMANN (2012): A continuous vertical grain sorting model for Telemac & Sisyphe. River Flow 2012 - International Conference on Fluvial Hydraulics, September 5-7, 2012, San Jose, Costa Rica
- MERKEL, U. H., R. KOPMANN (2014): Einsatz eines innovativen Untergrundmodells für die Feststofftransportmodellierung. Tagungsband zum BAW-Kolloquium „Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau“, 26.11.2014, Karlsruhe
- SANDLER, M., R. ZIEBOLD, A. HESSELBARTH, M. HOPPE, M. UHLEMANN (2017): Assistance Systems for Close Range Navigation on Inland Waterways. PIANC Smart Rivers Conference 2017, Pittsburgh, USA, 18.-21. September 2017
- SCHMIDT, A., L. BACKHAUS, C. HEINZELMANN (2014): Methoden zur Simulation morphodynamischer Prozesse in Binnenwasserstraßen. Korrespondenz Wasserwirtschaft 2014 (7) Nr. 8
- SCHMIDT, A. (2017): Assistenzsysteme für die Binnenschifffahrt - Grundlagen und Voraussetzungen. Tagungsband zum 38. Duisburger Kolloquium „Das Schiff und die Assistenzsysteme“, am 8./9. Juni 2017 am Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT), Universität Duisburg-Essen in Duisburg
- SCHRÖDER, P. M. (2017): Binnenschifffahrt 4.0 – Voraussetzungen für einen autonomen Betrieb. ATZ extra Mobilität 4.0, Sonderheft für die VDI-FVT 2017/2018, S. 48-51
- SCHULZE, L., C. THORENZ, J. STAMM (2014): Entwicklung eines numerischen Ansatzes für die Modellierung von Lufteintrag und -transport in einem Schleusenfüllsystem. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 50, S. 403-412
- SCHULZE, L. (2018): Development of an Application-Oriented Approach for Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering. Dissertation der TU Dresden 2018, Veröffentlichung in Vorbereitung
- THORENZ, C. (2010): Numerical evaluation of filling and emptying systems for the new Panama Canal locks, 32nd PIANC Congress, 10.-14.05.2010 Liverpool, 22 S. (elektronisch veröff.), ISBN 978-1-61738-795-1
- THORENZ, C., F. BELZNER, T. HARTUNG, L. SCHULZE (2017): Numerische Methoden zur Simulation von Schleusenfüllprozessen. In: BAW Mitteilungen 100, S. 91-108, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV):
https://www.wsv.de/wasserstrassen/bauwerke_und_anlagen/ (aufgerufen am 20.04.2018)
- WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz), 31.07.2009



Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Schmidt

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstr. 17

76187 Karlsruhe

Tel.: 0721/ 9726 3010

E-Mail: andreas.schmidt@baw.de

1978 – 1986

Studium des Bauingenieurwesens, Vertiefung Wasserwesen an der RWTH Aachen und Engineering Hydrology am Imperial College of Science and Technology, London

1986

Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft / Lehrgebiet für Wasserenergiewirtschaft der RWTH Aachen

1986 – 1993

Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin, Promotion

1993 – 1999

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin, Leiter des Sachbereichs „Gewässermorphologie“

seit 1999

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

1999 – 2003: Referatsleiter Flusssysteme II

2003 – 2008: Referatsleiter Flusssysteme I

seit 12/2008: Leiter der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich

Hydraulische Modellierung – eine wesentliche Grundlage für die erfolgreiche integrierte Gewässerentwicklung

Peter Horchler und Andreas Anlauf

1 Einleitung

Die allermeisten Gewässer und Auen in Mitteleuropa, aber auch in Nordamerika und anderen dicht besiedelten Regionen der Welt, wurden in der Vergangenheit in hohem Maße anthropogen verändert. So sind heute ihre natürlichen Funktionen wie Hochwasser- und Nährstoffrückhalt sowie Kohlenstoffspeicherung, aber auch die für den Erhalt der Biodiversität wichtigen Habitatfunktionen, stark reduziert. Demgegenüber führen ein gewachsenes Umweltbewusstsein, die gesteigerte Wahrnehmung der nutzstiftenden Leistungen intakter Ökosysteme und, damit einhergehend, gesetzliche Regelungen und Strategien (z. B. die Umsetzung von Wasserrahmenrichtlinie, FFH- und Vogelschutzrichtlinie in nationales Recht sowie die nationale Biodiversitätsstrategie) dazu, dass die ökologische Entwicklung der Gewässer heute einen hohen Stellenwert besitzt.

Ein wichtiger Ansatz ist dabei die integrierte ökologische Gewässerentwicklung, die die Betrachtung struktureller, chemischer, biologischer und ökosystemarer Aspekte umfasst und ebenfalls berücksichtigt, dass dies im dicht besiedelten Mitteleuropa nur in einem integrativen Ansatz geschehen kann, der versucht, auch den Belangen aller Gewässeranrainer und -nutzer gerecht zu werden. Um beurteilen zu können, welche Maßnahmen zur integrierten Gewässerentwicklung letztendlich erfolversprechend sind, ist es daher essenziell, das Ökosystem Gewässer inklusive seiner Aue sehr gut zu verstehen.

Alle Lebensräume (= Habitate) im Gewässer und seiner Aue sind maßgeblich durch den Faktor „Wasser“ geprägt. Gewässerstruktur, Lebensraum und Lebensgemeinschaft sind unmittelbar miteinander verzahnt. Ein natürliches Wasserstandsverhalten und ein naturnahes Gewässerbett mit gewässertypischen Formen und Strukturen sowie die Vernetzung mit einer naturnahen Aue sind wesentliche Grundlagen für die Besiedlung mit typischen Tier- und Pflanzenarten. Ohne gewässertypische Strukturen gibt es kaum biologische Vielfalt, der gute Zustand ist nicht zu erreichen, die ökologische Funktionsfähigkeit nicht zu gewährleisten.

Für die Gewässerabschnitte, in denen Entwicklungsmaßnahmen geplant sind, müssen deshalb die hydrologischen und hydraulischen Verhältnisse im Detail bekannt sein, und zwar sowohl für den Istzustand als auch für den Planungs- oder Zielzustand. Da für den noch nicht realisierten Zielzustand keine Messungen vorgenommen werden können, dienen die Ergebnisse

hydraulischer Modellierungen als Grundlage für die Abschätzung und Bewertung der Änderungen der Habitate für Pflanzen und Tiere. Bei guter Datenlage können sogenannte Habitat- oder Lebensraumeignungsmodelle erstellt werden, die ggf. auch in die Fläche projiziert werden können. Hierdurch wird eine quantitative Abschätzung ökologischer Veränderungen möglich, die z. B. als Grundlage für die Auswahl bestimmter Planungsvarianten dienen kann.

Für viele wichtige Raumplanungen an Gewässern werden heute v. a. hydraulische Modelle entwickelt und prognostisch eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen für geplante zukünftige Zustände stellen derzeit die einzige geeignete Datengrundlage für die Anwendung von Habitatmodellen für Organismen in Gewässern und Auen dar. Flächige Habitatmodelle sind dabei wichtige Prognosewerkzeuge für die Erkundung ökologischer Entwicklungspotenziale und sollen künftig verstärkt eingesetzt werden.

2 Beispiele für die Verwendung von Ergebnissen hydraulischer Modellierungen

Im Folgenden werden nun mehrere Beispiele für den erfolgreichen Einsatz von Ergebnissen hydraulischer Modellierungen auf zwei unterschiedlichen räumlichen Skalen – auf lokaler Ebene und auf der Ebene von Flussabschnitten – vorgestellt.

2.1 Projekte auf lokaler Ebene

Buhnenprojekt

In einem Projekt an der Mittleren Elbe (KLEINWÄCHTER et al. 2017) wurde untersucht, wie sich alternative Buhnenformen (Knick- und Kerbbuhnen) im Vergleich zu Regelbuhnen auf wichtige Organismen der Elbe und ihrer Ufer auswirken. Nach dem Bau der Versuchsbuhnen wurden über mehrere Jahre hochaufgelöste Messungen der Fließgeschwindigkeit und der Sohltopographie in acht Versuchsbuhnenfeldern, begrenzt durch alternative Buhnen und Regelbuhnen, durchgeführt. Diagnostisch wichtige Wasserstände wurden einem 1D-Hydraulikmodell der BAW entnommen. Diese Daten bildeten die Grundlage für die Analyse der Habitatqualität und -verfügbarkeit von Fischen, Makrozoobenthos, Laufkäfern und der Pioniervegetation in Buhnenfeldern. Für die untersuchten Tiere wurden zudem statistische Habitateignungsmodelle entwickelt (Abb. 1).

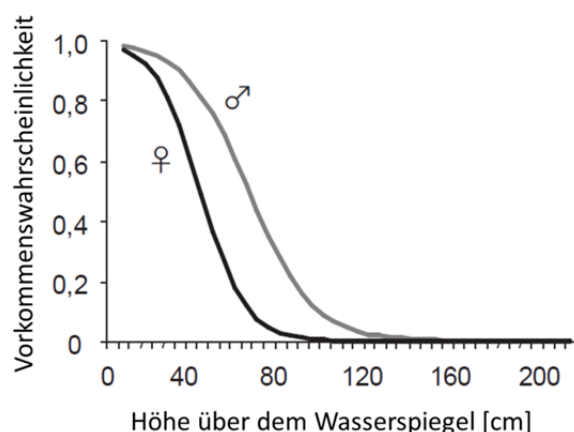


Abb. 1:
Habitateignungsmodell (Logistische Regression) für die Laufkäferart *Bembidion velox* (Männchen und Weibchen) entlang der Höhenlage zum Wasserstand (Abbildung leicht verändert aus KLEINWÄCHTER et al. 2017)

Die Ergebnisse dieses Projektes lieferten wichtige Hinweise für die künftige Gestaltung von Buhnen mit dem Ziel einer Verbesserung der Uferlebensräume an frei fließenden Flüssen. So konnte beispielsweise nachgewiesen werden, dass eine Kerbe am Buhnenfuß eine Durchströmung ermöglicht, die oft das Strömungs- und Sedimentationsmuster im Buhnenfeld diversifiziert, was wiederum eine positive Wirkung auf die Vielfalt der Flora und Fauna entfaltet.

Konnektivitätsprojekt

Tieflandflüsse und ihre Auen stellen ein zusammenhängendes zumindest temporär verbundenes Gewässersystem dar. Die Fischzönose der Fließgewässer ist zu einem großen Teil auf die Zugängigkeit der Auen angewiesen. Nur wenige Arten leben ausschließlich im Hauptstrom. Zahlreiche Fischarten sind zumindest phasenweise an die unterschiedlichen Habitate des Nebengewässersystems gebunden. Es wird daher angenommen, dass eine gute hydrologische Konnektivität *den* Schlüsselfaktor für intakte funktionelle Prozesse und eine hohe Biodiversität großer Fließgewässer darstellt. Die Artenzusammensetzung der Fischfauna müsste daher ein guter Indikator für den Grad der Vernetzung von Fluss und Aue sein.

Um diese Annahmen zu überprüfen werden daher im Rahmen der BMU-Maßnahme 6: *Biodiversität – Strukturdiversität* von der BfG Arbeiten zur hydrologischen Konnektivität zwischen Fluss und Aue durchgeführt. Hierbei soll an der Mittleren Elbe die Wirkung unterschiedlicher Konnektivität (= Vernetzung von Fluss und Aue) von Auengewässern auf die Fischfauna (v. a. auf die Jungfischgemeinschaften und ihre Strukturdiversität) über mehrere Jahre und unter unterschiedlichen Abflussbedingungen untersucht werden. Das Ziel ist dabei herauszufinden, wie sich Artenzusammensetzung, Artendiversität, Altersstruktur, biologische Artmerkmale und Lebensstrategien der Fischgemeinschaften in Abhängigkeit von der Anbindung (Frequenz, Zeitpunkt, Dauer, Magnitude) in Auengewässern der Mittel- und Unterelbe verändern.

Die Ermittlung der Anbindungssituationen erfolgt mit dem Webdienst FLYS der BfG (BfG 2013). Dafür werden die Abflüsse, bei denen die Untersuchungsstandorte hydrologisch an die Elbe angeschlossen sind, am jeweiligen relevanten Pegel ermittelt, und im Gelände überprüft. Anschließend werden Pegelstände (auf täglicher Basis) mit den errechneten Schwellenwerten abgeglichen, um die Häufigkeit und Dauer der Anbindung zu errechnen. Auch der Zeitpunkt der Anbindung lässt sich so ermitteln. Diese Analyse erlaubt somit letztendlich eine Klassifikation der untersuchten Vorlandgewässer (Abb. 2).

Studie Vorlandrauhigkeiten

Im Rahmen einer Masterarbeit an der Universität Twente (VAN DYK 2006) wurde eine Studie zur Wirkung unterschiedlicher Vorlandrauhigkeiten auf die Flusswasserstände bei Hochwasser im Bereich des Naturschutzgebietes Emmericher Ward am Niederrhein durchgeführt. Hintergrund dieser Studie war der Wunsch des NABU, den Waldanteil in diesem Gebiet zu erhöhen. Anhand eines einfachen 1D-Modells (INFORM-DSS) wurde u. a. berechnet, mit welchen Unterschieden im Wasserstand bei HHQ (1995) und bei vollständigem Bewuchs des Vorlandes mit potenziell natürlicher Vegetation (v. a. Auwald und Röhricht) im Vergleich zu vollständiger Weidenutzung zu rechnen wäre. Grundlage hierfür war die Zuweisung von Rauigkeitsbeiwerten zu bestimmten Habitattypen des Gebietes. Die vollständige Bewaldung führte demnach zu einer Anhebung des Wasserstandes bei HHQ um 3 cm gegenüber dem Istzustand (nur teilweise Gehölz bestockt). Eine alleinige, flächendeckende Weidenutzung

hätte nach diesem Modell ein Absinken des Wasserstandes bei HHQ um 6 cm zur Folge. Das Vorhaben des NABU, gezielt an einer Stelle die Waldentwicklung zuzulassen, wurde durch eine detaillierte Untersuchung der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) anhand eines instationären hydropotentialnumerischen 2D-Modells begleitet (SCHRÖDER 2010). Hierdurch konnte nachgewiesen werden, dass ein gegenüber der ursprünglichen Planung reduzierter Waldflächenanteil im Strömungsschatten des Rheins als hochwasserneutral anzusehen ist.

Derartige Aspekte werden auch künftig bei der Planung von Maßnahmen zur Gewässer- und Auenentwicklung und deren geforderte Hochwasserneutralität eine wichtige Rolle spielen.

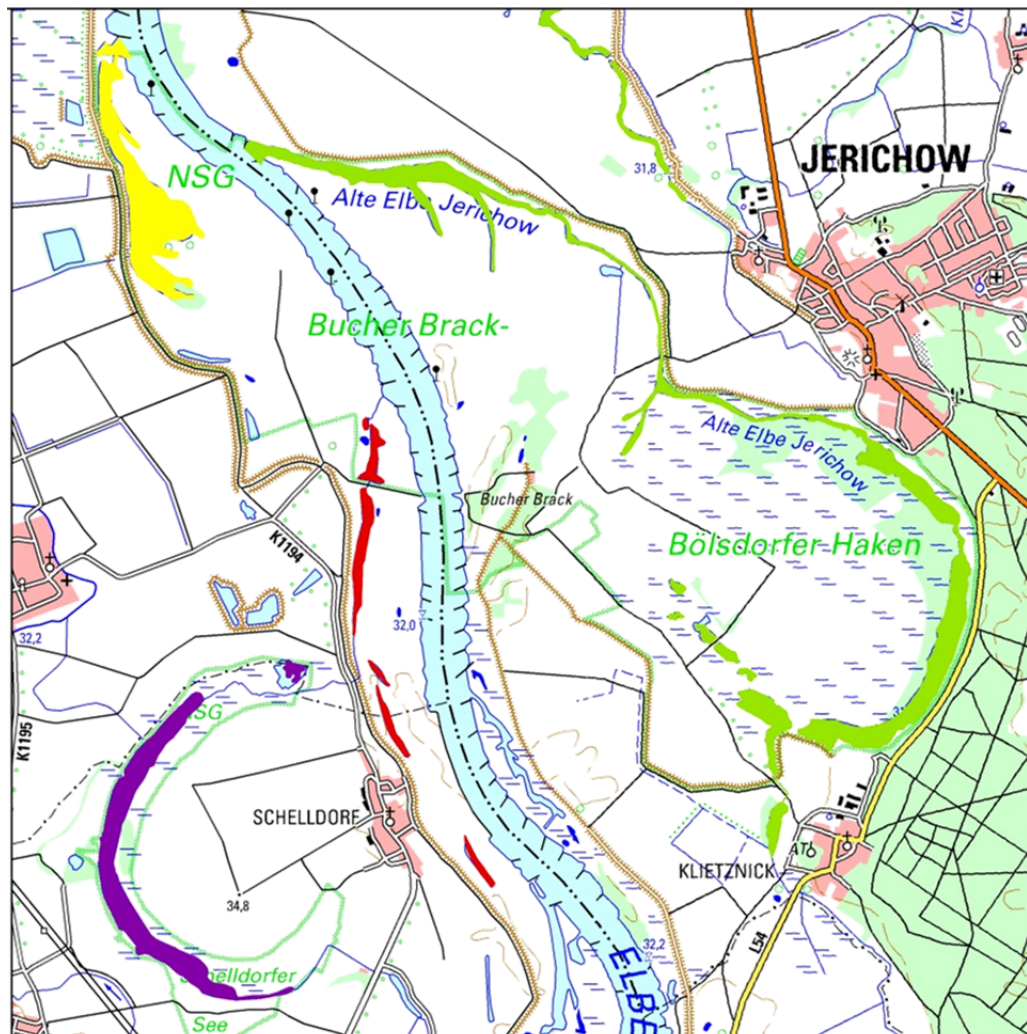


Abb. 2: Beispiel für eine unterschiedliche Anbindung von Vorlandgewässern an die Elbe.
Gelb: permanent angebunden (Parapotamon)
Grün: episodisch angebunden (Plesiopotamon)
Rot: bei extremen Hochwassereignissen angebunden (Palaeopotamon)
Violett: nie angebunden, d. h. in der fossilen Aue

2.2 Projekte auf der Ebene von Flussabschnitten

Einschätzung der Naturnähe von Auenabschnitten

In dem an der BfG entwickelten Softwarepaket INFORM („Integrated Floodplain Response Modeling“; FUCHS et al. 2012) gibt es das Modul „Flut“, das eine Simulation der jährlichen Überflutungsdauer erlaubt. Als Grundlage für diese hydrographische Methode werden Pegel- daten, Querprofile sowie mit FLYS berechnete Wasserstände verwendet. Überall dort, wo keine mehrdimensionalen hydraulischen Modelle vorliegen, liefern die mit INFORM model- lierten Überflutungsdauern eine gute Grundlage für eine erste Analyse und Prognose der Ha- bitatpotenziale von Pflanzen und Tieren. So können beispielsweise leicht die Flächenanteile von Lebensräumen oder Arten, die vorzugsweise unter bestimmten Überflutungsdauern vor- kommen, ermittelt werden. Dies erlaubt ebenfalls eine schnelle Einschätzung der Natürlich- keit von Flussabschnitten. So weisen naturnahe Abschnitte von Tieflandflüssen, wie bei- spielsweise der Mittleren Elbe (z. B. Elbaue bei Rühstädt, Km 438 – 451), relativ viele lang überflutete Flächen auf, während Abschnitte, die stark von Tiefenerosion der Sohle betroffen sind (z. B. Elbaue bei Klöden, Km 183 – 193), überwiegend trockene, d. h. nur kurz überflu- tete Flächen aufweisen (Abb. 3).

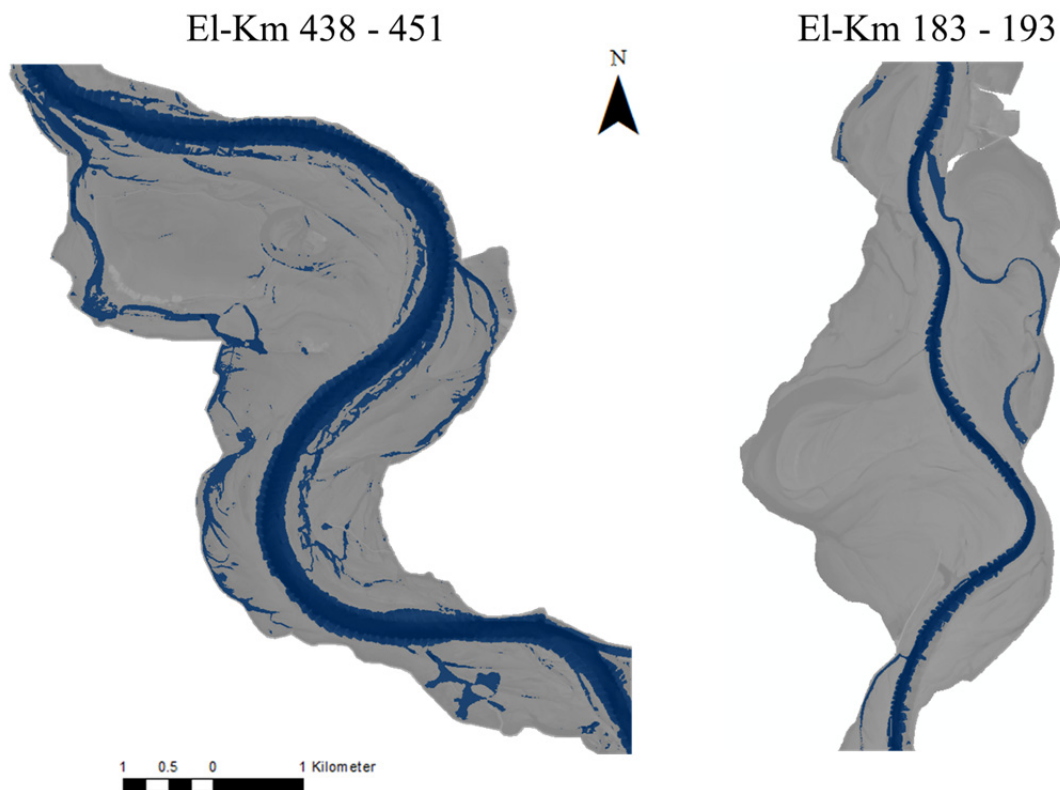


Abb. 3: Vergleich der Vorlandflächen an der Elbe (blau), die ≥ 100 Tage pro Jahr überflutet sind. Grundlage sind die mit dem INFORM-Modul Flut3 modellierten langjährigen mittleren Überflutungsdauern (1990-2017). Links: Elbaue bei Rühstädt (Km 438 – 451) ohne nennenswerte Sohlerosion. Rechts: Elbaue bei Klöden (Km 183 – 193) mit mas- siver Sohlerosion. Grau hinterlegt sind die Höhenunterschiede bzgl. des Wasserstandes bei MQ im Bereich der aktiven Aue.

Projekt Klöden

Im Pilotprojekt „Klöden“ (Elbe-Km 185,5 – 196,7; GABRIEL et al. 2011) sind flussbauliche Maßnahmen zur Minderung der Tiefenerosion der Elbsohle geplant, die auch zu einer Verbesserung der Habitatqualität der Ufer (Uferabflachung) und der Aue (Altarmanbindung) führen sollen. Um derartige Verbesserungen zu quantifizieren und um Vorzugsvarianten zu identifizieren, kommen Habitatmodelle für die Auenvegetation zum Einsatz (HORCHLER 2016), die auf Grundlage hydraulischer Daten aus einem 3D-hydrnumerischen Modell der BAW (PATZWAHL & FAULHABER 2010) entwickelt wurden. Abbildung 4 zeigt beispielhaft zwei mögliche Maßnahmenvarianten.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Flächenbilanz für die potenziellen Habitate der Uferpionierart Elb-Spitzklette (*Xanthium albinum*) bei Anwendung der zwei Maßnahmen. Grundlage hierfür war ein statistisches Habitatmodell, das durch Felddaten aus dem Jahr 2009 erstellt werden konnte (HORCHLER 2016).

Durch die Modellierung und die flächige Quantifizierung der Habitate mehrerer Pflanzenarten, die typische Vertreter der Auenvegetation sind, konnten die Folgen der beiden Varianten abgeschätzt und eine Vorzugsvariante ermittelt werden.

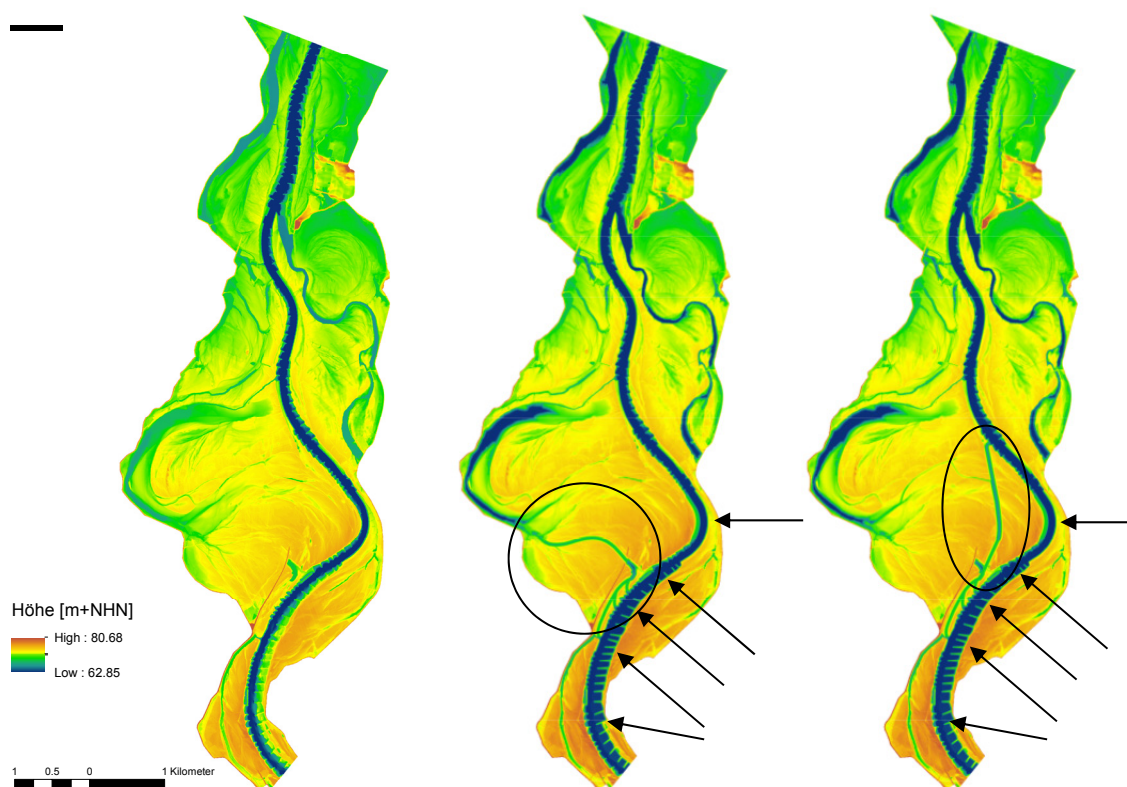


Abb. 4: Digitale Geländemodelle des Untersuchungsgebietes Klöden (Elbe-Km 185,5 – 196,7) für den Ist-Zustand (links), eine Variante mit Altarmanbindung (Mitte) und eine Variante mit technischer Flutrinne (rechts). Die Kreise kennzeichnen die Lage der Altarmanbindung bzw. die der Flutrinne. Der oberste Pfeil weist auf einen Bereich in dem eine Vorlandabgrabung geplant ist, die unteren markieren eine Bühnenfeldberäumung. Datenquelle: DGM-W

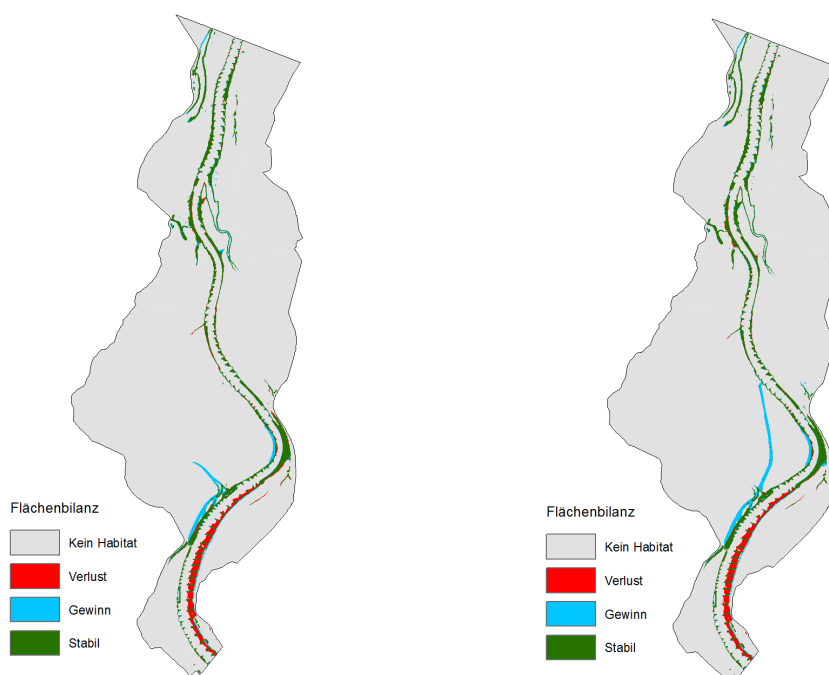


Abb. 5: Flächenbilanz des statistischen Modells der für die Uferpionierart Elb-Spitzklette (*Xanthium albinum*) geeigneten Habitate für die beiden Varianten „Altarmabindung“ (links) und „Flutrinne“ (rechts) (aus HORCHLER 2016)

3 Fazit

Die wenigen gezeigten Beispiele verdeutlichen, dass eine erfolgreiche integrierte Gewässerentwicklung und die dafür notwendigen wissenschaftlichen Untersuchungen heute ohne belastbare Ergebnisdaten aus hydraulischen Modellen nicht denkbar wären. Landschaftspflegerische Entwicklungs- und Gestaltungsmaßnahmen können heute schon oft auf solche Ergebnisse zurückgreifen. Die profunde Kenntnis der hydrologischen und morphologischen Prozesse in Flussauen und eine enge Zusammenarbeit der Landschaftspfleger und Ökologen mit den Experten auf dem hydrologischen Gebiet sichert so die Nachhaltigkeit der integrierten Gewässerentwicklung. In der Bundesanstalt für Gewässerkunde mit ihrem breit gefächerten interdisziplinären Personal sind die Voraussetzungen für diese Zusammenarbeit ideal.

4 Ausblick

Technische Verbesserungen der hydraulischen, morphologischen und ökologischen Modellansätze werden künftig auch zu Verbesserungen der integrierten Entwicklung unserer Flüsse und ihrer Auen führen. Misserfolge bei Renaturierungsmaßnahmen können somit reduziert oder vermieden werden. Mehrdimensionale hydraulische 2D- und 3D-Modelle werden künftig zunehmend für große Gewässer verfügbar sein. Hierdurch können vor allem auch die Habitatmodelle für Fische und das Makrozoobenthos profitieren. Eine wichtige, z. B. von den Vegetationsökologen „herbeigesehnte“ technische Verbesserung wäre die Koppelung von hydraulischen und morphologischen Modellen. Da viele Entwicklungsmaßnahmen darauf

abzielen, Ufer und Auenbereiche zu redynamisieren, sind Aussagen oder zumindest Abschätzungen zur morphologischen Entwicklung, z. B. bei Uferentsiegelungen im Bereich des Prallhangs, dringend erforderlich. Auch im Zusammenhang mit Ökosystemleistungen, wie der Phosphorretention oder der Kohlenstoffspeicherung, aber auch der Schadstoffdeposition in bzw. auf Auenböden, sind belastbare Aussagen zum Sedimentations- und Erosionsgeschehen in Auen hochgradig erwünscht.

Literatur

- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.) (2013): 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.;
http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst4_2013.pdf.
- FUCHS, E., M. SCHLEUTER, S. ROSENZWEIG (2012): Integrated Floodplain Response Model (INFORM) as a tool to predict effects of human impact on habitats of plants and animals along waterways. Special Volume “*River Systems*” - IAD 38th Conference Dresden, June 22-25, 2010. Schweizerbart
- GABRIEL, T., E. KÜHNE, P. FAULHABER, M. PROMNY, P. HORCHLER (2011): Sohlenstabilisierung und Erosionseindämmung am Beispiel der Elbe. *Wasserwirtschaft* Heft 6, S. 27-32
- HORCHLER, P. (2016): Modellierung der Veränderung von Pflanzenhabitaten im Untersuchungsgebiet des Pilotprojektes „Klößen“ Elbe-Km: 185,5 – 196,7. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1900. Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden
- KLEINWÄCHTER, M., T. MÜNCHENBERG, O. RICHTER, O. LARINK (2017): Laufkäfer (Carabidae). In Kleinwächter, M., U. Schröder, S. Rödiger, B. Hentschel, A. Anlauf (Hrsg.): Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 11, Alternative Bühnenformen in der Elbe – hydraulische und ökologische Wirkungen. 281 S., ISBN 978-3-510-65327-0. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart
- PATZWahl, R., P. FAULHABER (2010): Elbe, Klößen (Km 185,5 – 196,6) – Istzustandsanalyse mit einem 3D-HN-Modell. Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau, Auftragsnummer A39530210118-01. Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Dresden. Karlsruhe
- SCHRÖDER, M. (2010): Hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen von einer Nebenrinne und Auewaldpflanzungen im Bereich des Emmericher Wards, Rhein-km 854,0 – 859,0. Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau, Auftragsnummer A395.301.10093. Im Auftrag der NABU Naturschutzstation e.V., Kranenburg. Karlsruhe, September 2010
- VAN DYK, E. (2006): Development of a GIS-based hydraulic-ecological model to describe the interaction between floodplain vegetation and riverine hydraulics. Master thesis at the University of Twente, Enschede, The Netherlands



Kontakt:

Dr. Peter J. Horchler

Bundesanstalt für Gewässerkunde/
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5936
E-Mail: horchler@bafg.de

Jahrgang 1960

1983 – 1991

Studium der Biologie an der Universität Bonn

1992 – 1996

Wissenschaftlicher Angestellter der Bundesanstalt für
Gewässerkunde

1996 – 2000

Freiberuflicher Gutachter

2000 – 2004

Wissenschaftlicher Angestellter an der Universität
Leipzig

seit 2004

Wissenschaftlicher Angestellter der Bundesanstalt für
Gewässerkunde

Projektbearbeitung:

1992 – 1996: UVU, Landschaftspflegerische Begleitpläne
und Unterhaltungspläne an Bundeswasser-
straßen

1994 – 2000: Entwicklung der ökologischen Grundlagen
für das Modellsystem INFORM

2000 – 2004: Koordination eines wissenschaftlichen Ver-
bundprojekts zur Waldökosystemforschung

2004 – 2009: Weiterentwicklung ökologischer Modelle im
Rahmen des EU-INTERREG IIB Projektes
„nature-oriented flood damage prevention“

Seit 2009: Weiterentwicklung und Anwendung von
empirischen und statistischen Habitatmo-
dellen im Rahmen von FuE-Projekten, z. B.
KLIWAS, sowie zur Beratung der WSV,
z. B.:

- Grenzstrecke Niederrhein (WSA Duisburg
Rhein)

- Pilotprojekt Klöden (WSA Dresden,
GDWS Ast. Ost)



Kontakt:

Dr. Andreas Anlauf

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306 5476
E-Mail: anlauf@bafg.de

Jahrgang 1958

1978 – 1984

Studium Diplom-Biologie an der Universität Köln

1984 – 1989

Promotion an der Universität zu Köln

1984 – 1992

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität
Köln

seit 1992

Wissenschaftlicher Angestellter der Bundesanstalt
für Gewässerkunde

Projektbearbeitung:

1992 – 2001: Tierökologie bei Unterhaltung, Ausbau und Neubau der Bundeswasserstraßen in der Außenstelle Berlin der BfG

seit 2001: Tierökologie bei Unterhaltung, Ausbau und Neubau der Bundeswasserstraßen im Binnenbereich

seit 2008: Untersuchungen zur Biodiversität großer Fließgewässer in Abhängigkeit von der Strukturdiversität

seit 2015: Fachliche Koordination der Studie und Beiträge zum „Bundesprogramm Blaues Band Deutschland“

Die Musik und das Wasser – ein kurzer musikgeschichtlicher Ausschnitt

Jens Schawaller

1 Einführung

Zu allen Zeiten der Menschheitsgeschichte scheint es den kreativ handlungsorientierten Menschen ein wichtiges Anliegen gewesen zu sein, sich künstlerisch mit den Erfahrungen des Lebens – wozu auch die Naturphänomene (wie beispielsweise das Wasser) gehören – auseinanderzusetzen und diesen Prozess in der Erschaffung eines Artefakts äußerlichen Ausdruck zu verleihen. Das Kunstwerk steht dann nicht nur am Ende eines ästhetisch motivierten und handwerklich ausgeführten Schaffensprozesses, sondern auch an der Schwelle der Weitergabe von individueller Welterfahrung und deren Vermittlung zwischen zwei Menschen. Mehr noch, ein Kunstwerk kann sogar eine Reflexion und eine Bewusstseinsweiterung im dialogischen Gegenüber auslösen, so dass die Wirkungsgeschichte bei weitem über die Erschaffungs- und Rezeptionsgeschichte des Urhebers des Artefakts hinausgeht.

Das menschliche Gefühlsleben wurde und wird dabei oftmals Gegenstand einer Auseinandersetzung mit der Welt, in der sich Kunst als ein Gegenüber darstellt, an dem sich der Kunstherstellende und der Kunstkonsumierende verändern kann. Kunst wird somit zu einem Mittel der Selbstreflexion und zum Auslöser eines Entwicklungsprozesses, zu dem unseres Wissens nur die menschliche Spezies in der Lage zu sein scheint.

Als Berufsmusiker liegt mein besonderes Ohrenmerk natürlich auf der tönenden Kunst. Ich danke ganz herzlich Herrn Norbert Busch, der mich eingeladen hat, einen verschwindend winzigen Ausschnitt der Musikgeschichte referieren zu dürfen, in dem das Wasser eine Rolle spielt oder konkret thematisiert wird. Angesichts der Kürze des Referates kann ich selbstverständlich nur blitzlichtartig das eine oder andere Werk der fast unüberschaubaren Musikgeschichte benennen; trotz aller Unvollständigkeit möchte ich gerne dennoch daran erinnern, wie musizierende Menschen zu unterschiedlichen Zeiten verschiedene künstlerische Konzepte verfolgt haben. Lassen Sie mich deshalb mit ein paar ausgewählten Musiken – ohne jeden Anspruch auf Vollständigkeit – unterschiedliche Kunstwerke vorstellen.

2 Musik und Wasser im alten China

Als erstes Musikstück möchte ich die Komposition „**Der strömende Fluss**“ für die Quin (die Quin oder Ch'in ist ein traditionelles chinesisches Saiteninstrument) anführen. Der Komponist **Yü Pó-Ya** lebte in einem Zeitraum von ca. 700 bis 200 v. Chr. und wollte mit seiner Musik für seine Zuhörer den Lauf eines Flusses nacherlebbar machen. So erweckte die

Komposition für den Zuhörer des Kulturkreises seiner Zeit offensichtlich die Assoziation von einer Berglandschaft, die von Wolken umhüllt ist, die Assoziation an eine Quelle, an den langsam dahinströmenden Fluss, an ein Schiff in Stromschnellen und an den in der Ferne verschwindende Fluss. Der Musik liegt ein Programm zugrunde, welches beim Zuhörer als wiedererkennbar vorausgesetzt wird. Es finden sich in dieser Musik also bereits außermusikalische Phänomene musikalisch-programmatisch verarbeitet. Heute fällt es uns angesichts einer völlig anderen Musikästhetik möglicherweise schwer, die vom Komponisten gewünschten assoziativen Verknüpfungen zu leisten. Dennoch können wir hier bereits grundsätzlich einen Mechanismus erkennen, der bis auf den heutigen Tag in unserer Kultur wirkmächtig ist: Ein außermusikalisches Programm liegt einer Musik zugrunde; man spricht in diesem Zusammenhang von „Programmmusik“. Als Vorgriff erlaube ich mir, schon hier auf Bedřich Smetanas „Moldau“ hinzuweisen, auf die ich später noch eingehen werde.

3 Musik und Wasser in der griechischen Antike

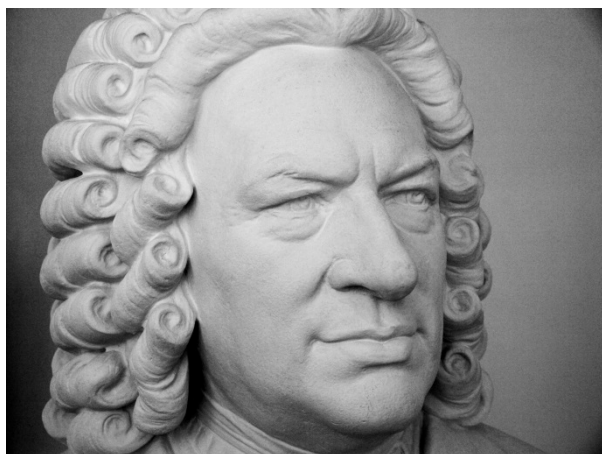
Der Mechaniker **Ktesibios** (3. Jahrhundert v. Chr.) gilt als der erste Quellenautor, der die Wasserorgel – oder Hydraulis – näher beschrieb. Es handelt sich dabei um ein lautstarkes Freiluftinstrument, das seinen Ursprung in einer physikalischen Lehrvorrichtung hatte, das Schülern das Wirken des Winddruckes anhand einer zum Klingen gebrachten Pfeife zeigen sollte. Dazu wurde mithilfe von Wasser ein nahezu gleichbleibender Winddruck erzeugt und in einen Kasten geleitet, auf dem sich eine Pfeife befand. Das Erklängen dieser Pfeife demonstrierte den Mechanikern der griechischen Antike anschaulich das Wirken komprimierten Windes. In einem weiteren Schritt wurde aus dieser pädagogischen Vorrichtung ein Musikinstrument, das sich bald großer Beliebtheit erfreute. Dazu musste neben der Windversorgung ein Ventilöffnungssystem erfunden werden, was aus einem pädagogischen Hilfsmittel ein Instrument machte. Quellen berichten, dass auch Kaiser Nero sich als Hydraulisspieler feiern ließ – und, dass das Instrument sehr bald als Freiluftinstrument in die römische Arena gelangte. Durch den Einsatz des Wassers wurde ein wesentliches Merkmal des Orgelbaus bereits in antiker Zeit erfunden: der gleichbleibende Winddruck. Wasser ist hierbei also ein unverzichtbarer Bestandteil des Instrumentes.

4 Musik und Wasser im englischen Barock

Georg Friedrich Händel (1685 – 1759) lieferte mit seiner populären und noch heute höchst beliebten „**Wassermusik**“ dem englischen König ein Konzertspektakel, das erstmals am 17. Juli 1717 stattfand. Der König bestieg im Rahmen eines prächtigen Balles eine Barke, der eine weitere mit fünfzig Musikern folgte: Trompeten, Oboen, Fagotte, Querflöten, Blockflöten, Geigen und Kontrabässe. Das Konzertvergnügen fand also auf der Themse statt. Die Sammlung von Sätzen (1773 veröffentlicht) wurde später zu verschiedenen Anlässen immer wieder gespielt und erfreut sich auch noch heute größter Beliebtheit. Es handelte sich um eine Suite in F-Dur (erstmalig mit Hörnereinsatz), eine in D-Dur mit Hörnern und Trompeten (mit einer – wahrscheinlich improvisierten – Paukenstimme) und einer weiteren Suite in G-Dur für Quer-, Blockflöte und Fagott. Mit dieser Musik entsprach Händel den Wünschen und dem Musikgeschmack des Königs, um sich der Zuwendung seines potenten Mäzens sicher zu sein. Der Hintergrund liegt nämlich in seinem Entschluss, als Hofkomponist 1712 in England zu verbleiben. Damit wurde er seinem deutschen Dienstherrn, dem Kurfürsten von Hannover

gegenüber vertragsbrüchig. Als dieser dann 1714 den englischen Thron bestieg, wurde er wieder zu Händels Vorgesetzten, was den Komponisten zunächst mit tiefem Entsetzen erfüllte. Also plante der Hallenser Tonschöpfer die Wassermusik als Überraschungs- und Versöhnungsmusik, was sie zu Händels größter Freude auch leistete. So ist es kein Wunder, dass sie der König auf dem Hin- und Herweg des Flussvergnügens dreimal wiederholen ließ. Der Komponist wusste also das Aufführungsspektakel – ein rauschendes Fest auf einem „Vergnügungsdampfer“ – als Kulisse für seine prächtige Musik zu nutzen. Zu Händels Errungenschaften gehörte es, Musiken im passenden Rahmen anzubieten und die Atmosphäre eines besonderen Umstandes (z. B. Feuerwerksmusik) oder eines besonderen Ortes zu nutzen. Die Suiten der Wassermusik sind also weder nach einem außermusikalischen Programm komponiert, noch wollen sie das Naturphänomen künstlerisch illustrieren. Vielmehr handelt es sich um zu ihrer Zeit hochmoderne Musik, die dem besonderen „Event“ – nämlich einer Fahrt auf der Themse – zugeordnet sind. Es spricht für Händels Denken und für seine Cleverness, dass er damit noch einen zunächst verprellten und beleidigten Kulturmäzen für seine Arbeit gewinnen konnte.

5 Musik und Wasser im deutschen Barock



Anhand des Beispiels der großen Fuge in g-Moll aus „**Phantasie und Fuge in g-Moll für Orgel**“ (BWV 542) von **Johann Sebastian Bach** (1685 – 1750) sei darauf verwiesen, dass sich in Anlehnung an den Rhythmus des Themas die scherzhafte Bezeichnung „Kaffeewasserfuge“ tradiert hat: Assoziativ lässt sich die Zeile „Das Kaffeewasser kocht...“ jedem Themeneinsatz zuordnen, was dem grandiosen Werk einen durchaus humoristischen Aspekt unter

Kennerinnen und Kennern verleiht. Die Kantate „Schweigt stille, plaudert nicht“ (BWV 211) aus der Feder des Thomaskantors ist auch als „Kaffeekantate“ bekannt und propagiert ungeübt den Genuss des beliebten Heißgetränkes. (Foto: Johann Sebastian Bach, Aufnahme: Schawaller)

Aber auch **Georg Philipp Telemann** (1681 – 1767) hat mit seiner „**Wassermusik**“ (TWV 55) – auch bekannt unter dem Titel „Hamburger Ebb’ und Fluth“ – dem Wasser ein musikalisches Denkmal gesetzt. Mit den Mitteln der Tonmalerei gelingt es ihm, das Naturphänomen hörbar und erlebbar zu machen. Anders als Georg Friedrich Händel, der sich zum festlichen Musizieren seiner Wassermusik auf die Themse begab, holte Georg Philipp Telemann die Erfahrung von Wasser und Gezeiten in den Konzertsaal – quasi der umgekehrte Weg.

6 Musik und Wasser im italienischen Barock

Die nächste Musik, auf die ich eingehen möchte, ist in unserem Kulturkreis schon viel vertrauter als althinesische Kultur: **Antonio Vivaldi** (1678 – 1741) setzt sich in seiner genialen Tondichtung „**Die vier Jahreszeiten**“ mit dem Thema des zu Eis und Schnee gefrorenen Wassers auseinander. Die „Leiden und Wonnen des Winters“ werden von ihm plastisch hör-

bar gemacht. Vermutlich stammen die Worte, die programmatisch über den Musiken stehen, auch vom Komponisten persönlich: „Zu gefrorenem Schnee erstarrend“, „Bei Kälte und grausamen Wind“ und „Zähneklappernd“. Hier nutzt der Komponist technische Möglichkeiten der Streichinstrumente seiner Zeit, um außermusikalische Erfahrungen beim Hörer zu assoziieren. Eine durch die Bogentechnik „krächzende“ und durch die Satztechnik „stehende“ Musik erinnert an „knackendes Eis“ und „in Winterschlaf erstarrte Natur“. Man „hört“ förmlich die Kälte. Oder aber es erinnern hohe und schnelle Bewegungen in der Solovioline an das Blasen eines kalten Windes. Auch das körperliche Klappern der Zähne kann durch einen entsprechenden Duktus musikalisch nachgeahmt werden. Es obliegt nun dem Können des Komponisten, assoziative Elemente kreativ zu einem höherwertigen Kunstwerk zu erheben. Vivaldi gelingt es durchaus, keine lediglich deskriptive Musik zu schreiben. Sie hat musikalischen Eigenwert, ist aber dazu bestimmt, außermusikalische Phänomene und deren subjektive Auswirkung beim Individuum nachzuzeichnen. Genau das gleiche fanden wir bereits bei Yü Pó-Ya, den mindestens 1900 Jahre vom italienischen Meister trennen.

7 Musik und Wasser in der deutschen Frühromantik

Lassen wir uns auf einen weiteren Zeitsprung ein und denken an **Franz Schubert** (1797 – 1828), dessen berühmte Kunstlieder „**Die Forelle**“ und „**Das Wandern**“ (aus: „Die schöne Müllerin“) ebenfalls das Wasser thematisieren. Durch eine Berührung von Dichtung und Musik im Bewusstsein des Komponisten schöpfte Schubert mit seinem Kunstlied eine neue Form, bei der sich Gesang und Klavierbegleitung als gleichberechtigte Elemente begegnen. Etwa 600 Lieder stammen von ihm, die alle zunächst außerhalb aller praktisch-gesellschaftlichen Verwendbarkeit standen; sie sind also „absolute Kunst“. 1820 entstand „Die Forelle“, deren Frühfassungen bereits bis ins Jahr 1818 zurückgehen. 1819 entsteht das „Forellenquintett“, das das Kunstlied verarbeitet. Die spielerische Wellenfigur in der Klavierbegleitung des Kunstliedes erinnert an das rhythmische Wiederkehren von Wasserwellen. Der durchsichtige Satz und die scheinbar volkstümliche Melodie erwecken den Eindruck von „sprudelndem Wasser“ und „munterem Fischlein“; zunächst scheint der Text von der Verführung eines jungen Mädchens zu sprechen. Bei genauerem Hinsehen zeigt sich das lyrische Ich allerdings als tatenloser Zeuge – Ohnmacht ist das eigentliche Thema des Liedes! Als Chiffre für ihre Lebenssituation fordern Schuberts Freunde dies Lied bei fast jeder Schubertiade. Es bleibt jetzt noch übrig, an die politische Dimension des Gedichtes Christian Daniel Schubarts zu erinnern; Schubart schrieb das Gedicht 1783 nämlich durchaus nicht nur als lustigen Reim über „geangelte Backfische“, sondern in politischer und autobiographischer Absicht. Ab 1777 wurde der schwäbische Dichter durch eine hämische Tücke von den Schergen des Herzogs Karl Eugen von Württemberg ohne Gerichtsverhandlung zehn Jahre auf dem Hohenasperg inhaftiert, weil er dessen Willkürherrschaft und Mätressenwirtschaft freimütig kritisierte. In der Metapher der gefangenen Forelle arbeitete der Dichter sein Schicksal im Gedicht verklau-suliert auf. Es begegnen sich also in diesem Kunstlied mehrere Dimensionen in einem Kunstwerk, das zunächst spielerisch und unterhaltsam erscheint. Die Techniken der Assoziation durch geschickten Einsatz eines instrumentenspezifischen Klanges und entsprechende Satztechnik rufen also Naturereignisse ins Bewusstsein, die ihrerseits über sich hinaus auf ein weiteres Programm verweisen. Es geht nicht mehr nur um eine Darstellung oder Reflexion der Naturgewalt, sondern darum, wofür Naturphänomene oder Zustände chiffrenhaft stehen können.

In der zyklischen Liednovelle „Die schöne Müllerin“ findet sich eine Sammlung von Selbstbekenntnissen eines jungen Müllerburschen, der sich mit den Erfahrungen junger Liebe und deren Vergänglichkeit auseinandersetzen muss. Der Bach – das Wasser – ist sein Begleiter auf der Wanderschaft, sein Zuhörer und sein Todesbringer. Das Wasser ist in diesem Zyklus also existentiell wichtig und zugleich mörderisch. Menschleid und Naturdämonie zeigen sich hier als ein beliebtes Thema der Romantik. Insofern steht das erste Lied „Das Wandern“ nur für einen ganzen Zyklus, der anhand des Baches als Bild tiefe menschliche Regungen widerspiegelt. Hier steht das Wasser für lockende und drohende Naturmacht, die uns mit dem persönlichen Tode konfrontiert.

8 Musik und Wasser in der national-sinfonischen Musik

Wie bereits der chinesische Komponist Yü Pó-Ya nimmt auch der böhmische **Bedřich Smetana** (1824 – 1884) seine Zuhörer in seinem Werk „**Die Moldau**“ aus dem Zyklus „Mein Vaterland“ auf eine musikalische Reise entlang des Flusses (böhmisch: Vltava). Es ist dies der zweite Teil eines großen sinfonischen Werkes, das das betont und bewusst nationale Bewusstsein des Komponisten widerspiegelt. Der Komposition liegt ein genaues Programm zugrunde, dem er musikalische Ideen zuordnet: So werden durch geschickte Instrumentierung und Satztechnik die beiden Moldauquellen hörbar (Warme und Kalte Moldau), das Moldauthema lässt einen großen und breiten, strömenden Fluss assoziieren; eine Waldjagd und eine Bauernhochzeit werden durch den Einsatz von Hörnern und durch eine echte Polka hörbar gemacht. Die Stimmung der bei Mondschein tanzenden Wald- und Wassernymphen macht der Tonschöpfer durch delikateste Musik nachvollziehbar; hier gelingt es ihm, Stimmungen hervorzurufen; es geht also in diesem Abschnitt nicht mehr um eine bloße Illustration, sondern um eine beim Betrachter erlebte Stimmung. Es folgen die Stationen St.-Johann-Stromschnellen, Prag und letztendlich die Elbe. Das der Musik zugrundeliegende Programm wird beim Hörer als bekannt vorausgesetzt, der Komponisten rechnet damit, dass bestimmte Chiffren (z. B. eine Polka, die als böhmischer Nationaltanz galt und gilt) als solche erkannt und gedeutet werden. Anders als bei Yü Pó-Ya rechnet man diese Tondichtung zur nationalen Schule. Bei der Aufführung aller sechs Tondichtungen Smetanas im Jahr 1882 verstanden die Zuhörer die Musik sofort als einen Ausdruck eines nationalen „Wir-Gefühls“. Die Musik galt als eine in Töne gegossene Demonstration für einen von der Donaumonarchie Österreich-Ungarn unabhängigen tschechischen Nationalstaat, der erst 1918 entstand. Die Nationalsozialisten verboten 1939 diese Musik, als die Tschechische Philharmonie sie als Antwort auf die Ausrufung des Protektorats Böhmen und Mähren spielte. Auch erklang sie 1968, als die sowjetischen Truppen in Prag einmarschierten. Im Herbst 1989 wurde diese Musik ausdrücklich denjenigen Studenten gewidmet, die gegen das erstarrte System protestierten. Musik und Politik bilden eine gewollte Einheit.

9 Musik und Wasser in der „humorvoll-sinfonischen“ Musik

Camille Saint-Saëns (1835 – 1921) wuchs als ein vielseitig begabtes Wunderkind auf. Er machte als Pianist, Organist, Komponist, Dirigent und Hochschulprofessor Karriere. Für seine Musikstudenten wählte er oftmals humorvolle, witzige Stücke. In Erinnerung daran schrieb er 1886 für eine Fastnachtskonzert 13 humorvolle „Bilder“, die er „**Karneval der**

Tiere“ nannte. Er verbot allerdings weitere Aufführungen zu seinen Lebzeiten, um nicht ausschließlich an diesem Werk gemessen zu werden. In seinem mit „Aquarium“ betitelten Stück „malt“ er den silbrigen Klang des perlenden Wassers. Dazu nutzt er u. a. den silberhellen Klang einer Glasharmonika, ein hochdifferenziertes Orchesterinstrument. Darüber hinaus vermag es Saint-Saëns, eine Stimmung herzustellen, in der man einen stolzen Schwan auf ruhigem Wasser innerlich zu visualisieren geneigt ist – gemäß seinem Programm. Der „Karneval der Tiere“ lebt auch von der Kenntnis anderer Musiken, die er z. T. parodistisch zitiert. Ebenfalls ist bei ihm ein Programm die Grundlage zum tieferen Verständnis seiner Musik. Saint-Saëns zeigt sich im „Karneval der Tiere“ ganz von seiner höchst fachlich-souveränen und gleichzeitig humorvollen Seite.

10 Musik und Wasser im französischen Impressionismus

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts kamen in Frankreich einige junge Maler auf die Idee, nicht mehr möglichst naturgetreu und gegenständlich zu malen, sondern den Eindruck (franz. „impression“) wiederzugeben, den ihnen ihre Umwelt bot. Den Impressionisten war der Eindruck eines einzigen Augenblickes wichtiger geworden, als die Dokumentation der sichtbaren Welt; auch wollten sie ausdrücklich keine Unterhaltung der Adressaten mehr. **Claude Debussy** (1862 – 1918) kreierte mit seiner Komposition **„La Mer“** (1905) eines seiner bekanntesten impressionistischen Orchesterwerke. Debussy bezeichnete sich selbst als einen ausgesprochenen Liebhaber und Kenner des Meeres – nur Zufälle hätten ihn davon abgehalten, eine Karriere als Seemann zu beginnen. Als Komponist wollte er es um jeden Preis vermeiden, die Natur so exakt wie möglich musikalisch nachzubilden, sozusagen klanglich abzuformen. Bei seinen „Drei sinfonischen Skizzen“ (1. Vom Sonnenaufgang bis zum Mittag auf dem Meer, 2. Spiel der Wellen und 3. Dialog des Windes mit dem Meer) geht es ihm ausgesprochen nicht darum, eine Geschichte (ein Programm) zu erzählen. Der rein illustrierenden Programmmusik stand Debussy eher kritisch gegenüber; viel eher wollte er Stimmungen einfangen. So entstand das Werk auch nicht etwa am Meer und durch dessen Sinneseindrücke ange-regt – sondern in Burgund, fernab eines jeden großen Wassers. 1889 kam Debussy in Paris mit ostasiatischer Gamelan-Musik in Berührung, was seine Tonsprache maßgebend beeinflusste. Den Hörern von 1905 war diese Musik zu wenig „plastisch“, der Form nach „chaotisch“ und in der Tonsprache zu neu, die Uraufführung brachte deshalb keinen großen Erfolg. Heute gilt das Werk allerdings als eines der größten Orchesterwerke überhaupt.

11 Musik und Wasser in der deutschen Spätromantik

Max Reger (1873 – 1916) komponierte eine Musik, die in ihrem Umfeld zunächst recht umstritten war. Sein Thema ist die Synthese von Musik, Sprache und Malerei. Dadurch steht sie zwischen der Musik Arnold Schönbergs, der durch die Emanzipation der Dissonanz eine gänzlich neue Musik (Atonalität) entwickelte und der traditionellen programmatisch orientierten Musik von Richard Strauss. Reger bewegte sich kompositorisch genau zwischen diesen beiden Richtungen, indem er die traditionelle Tonsprache erweiterte und neu kombinierte. Seine bewegte Harmonik und der dichte polyphone Satz waren seinen Zuhörern zunächst nicht nachvollziehbar. In den zwei Sätzen aus seinen **„Vier Tondichtungen für großes Orchester nach Arnold Böcklin“** op. 128 (1913), die ich hier kurz vorstellen möchte, geht der

Komponist davon aus, Musik als Sprache zu behandeln, die auf Bekanntem beruht, um nachvollziehbar zu sein. Das jeweils konkrete der vier unterschiedlichen Bilder Arnold Böcklins dient immer als eine Verständnishilfe für das, was in Max Regers Musik seinen Zeitgenossen ungewöhnlich erschien.

Auf der Grundlage des Bildes „Im Spiel der Wellen“ (1883) von Arnold Böcklin (1827 – 1901) schreibt Reger eine neuartige Musik. Das Bild ist – als Ausnahme im Werkschaffen Böcklins – eher heiteren Charakters und hat anekdotischen Hintergrund: Ein Badeurlaub auf der Insel Ischia habe es angeregt. Die gemalten Meereswesen weisen porträtartige Ähnlichkeit zu Freunden Böcklins auf. Pikanterweise ist es erotischen Inhaltes. Auf diesen Aspekt des menschlichen Lebens ist der Komponist in seiner Komposition jedoch nicht näher eingegangen. Max Reger lag es jedoch völlig fern, eine reine Programmmusik zu komponieren.

Das Gemälde „Die Toteninsel“ (1880) von Arnold Böcklin stellt eine steile und schroffe mit hohen Zypressen bewachsene Felseninsel in einem glatten, reglosen und schwarzen Gewässer vor dunklem Nachthimmel dar, auf der sich streng gefügte Grabkammern befinden. Ein Boot läuft in die Bucht ein, das von einer rudern Person bewegt wird. Davor steht eine weiß verhüllte Person vor einer quergestellten Bahre.

Sinfonische und tonmalerische Elemente zeichnen den kompletten Zyklus Max Regers aus; Richard Strauss sah ihn bereits sehr nah an der Programmmusik, die er selber sehr liebte. Für die Zuhörer des Umfeldes Max Regers war seine Harmonik allerdings hart an der Grenze des Nachvollziehbaren. Heute gilt sein Orchesterwerk als ein wichtiger Bestandteil der Orchesterliteratur.

12 Musik und Wasser in der Wiener Klassik



Es sei noch auf ein Kuriosum im Werkschaffen des österreichischen Komponisten **Johann Strauß jun.** (1825 – 1899) hingewiesen, dessen Name untrennbar in der Musik- und Tanzwelt mit dem Donauwalzer „**An der schönen blauen Donau**“ verbunden ist. In aller Regel wird mit diesem Opus das Klanggewand einer opulenten Orchestrierung assoziiert, womit die Komposition auch ihren Siegeszug durch die Welt antrat.

Zunächst wurde es aber als Vokalwerk für den Wiener Männergesangsverein komponiert, dann erst entstand das bekannte Orchesterwerk, das lange Zeit als die heimliche Hymne Österreichs galt. So verbinden sich auch hier außermusikalische Beobachtungen und Gefühlsregungen als Grundlage für ein Kunstwerk, das dieses Programm mit den Mitteln der Tonkunst umsetzt, um dann in einem Prozess der klanglichen Metamorphose noch eine politische Dimension zu erhalten. (Foto: Die Donau in Budapest, Aufnahme: Schawaller)

13 Musik und Wasser in englischen Rockmusik

Mit einem sehr charakteristischen quartklängigen Gitarrenriff gelang der englischen Rockband „**Deep Purple**“ im Jahr 1972 eine wiedererkennbare und weltweite bekannte musikalische Idee, die das Lied „**Smoke on the water**“ vom Album „Machine head“ zu einem globalen Kulturgut machte. Auch hier werden außermusikalische Erfahrungen – in diesem Fall handelt es sich um Rauchentwicklung in Zusammenhang mit einem Casinobrand über dem Genfer See bei Tonaufnahmen in Montreux – zum Anlass der Dichtung eines Liedtextes und der Komposition einer entsprechend zugeordneten Musik; als Ausdruck einer Jugendkultur gewann das Lied ebenfalls bekenntnishaften Charakter eines genau differenzierbaren Lebensgefühls in den 1970er-Jahren. In musikalischer Hinsicht pflegt die Aufführungspraxis eine dynamische Steigerung und einen wettstreitenden Dialog der Soloinstrumente – Prinzipien, die seit frühester Zeit der Instrumentalmusik eine formgebende und inhaltstragende Funktion innehaben. Insofern schließt sich an dieser Stelle ein Kreis in der Form- und Kulturgeschichte der Musik.

14 Zusammenfassung

Das Wasser hat als lebenswichtiges und gleichzeitig lebensbedrohliches Element in der Kunst- und Kulturgeschichte der Menschheit seinen eigenen Platz. Immer geht es den Musikern um die Auseinandersetzung zunächst mit der Musik als Kunst und um die Auseinandersetzung mit dem außermusikalischen Programm. Dabei kann die Musik rein assoziative und deskriptive Funktion haben, sie kann aber auch z. B. für politische und persönliche Bewusstseinswerdungsprozesse stehen. Letztendlich führt die künstlerische Auseinandersetzung mit dem Naturphänomen Wasser zu einer Synthese der bildenden, sprachlichen und klingenden Künste. Wichtig erscheint mir hierbei, dass es sich bei allen Kunstwerken um die Verarbeitung menschlichen Erlebens handelt, das – umgesetzt in ein Artefakt – von Menschen für Menschen geschaffen wurde. Kunst ist nämlich kein zu konsumierender Gegenstand, sondern ein Gegenüber, an dem man sich verändert, zumindest aber verändern kann – so man es will.



**Dekanatskantor
Jens Schawaller (Dipl.-A)**

B-Examen in Berlin
A-Diplom in Heidelberg
KA-Studium Orgelimprovisation in Heidelberg

Seit 1999

Ev. Dekanatskantor des unteren Westerwaldes
und künstlerischer Leiter des Ev. Dekanats-
kantorsates Westerwald Süd

Kontakt:

Jens Schawaller, DK (Dipl.-A)

Tonnerrestraße 43

56410 Montabaur

Tel.: 0176/ 8561 2553

E-Mail: Schawaller@online.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 <i>Vibrio</i> 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 |
| 5/2017 | Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen |
| 1/2018 | Messtechnik und Methoden in der Gewässermorphologie |
| 2/2018 | Möglichkeiten und Perspektiven von Biotestverfahren in der Gewässerüberwachung und Bewertung |