

TEXTE

70/2021

Abschlussbericht

Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von präventiven Hochwasserschutzmaßnahmen im Rahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms

Synthesebericht

von:

Marcus Hatz, Carina Schuh, Dinh Quang Duong, Thomas Maurer

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 70/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 21 211 0
FB000508

Abschlussbericht

Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von präventiven Hochwasserschutzmaßnahmen im Rahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms

Synthesebericht

von

Marcus Hatz, Carina Schuh, Dinh Quang Duong, Thomas Maurer
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

Abschlussdatum:
November 2020

Redaktion:
Fachgebiet II 2.1 Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden
Cindy Mathan, Corinna Baumgarten

Publikationen als pdf:
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Begleitung des Projekts

Die Arbeiten zu diesem FuE-Vorhaben im Nationalen Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) wurden flussgebietsübergreifend durch einen Projektbeirat sowie im Rahmen von „Flussgebietsgesprächen“ an Donau, Elbe und Rhein jeweils durch eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe begleitet. Folgende Institutionen nahmen mit wechselnden Vertreter*innen an den projektbegleitenden Sitzungen teil:

- ▶ Bayerisches Landesamt für Umwelt
- ▶ Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
- ▶ Bundesamt für Naturschutz
- ▶ Bundesanstalt für Gewässerkunde
- ▶ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
- ▶ Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Ausschuss Hochwasserschutz und Hydrologie
- ▶ Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Geschäftsstelle
- ▶ Flussgebietsgemeinschaft Elbe, Geschäftsstelle
- ▶ Flussgebietsgemeinschaft Rhein, Geschäftsstelle
- ▶ Flussgebietsgemeinschaft Weser, Geschäftsstelle
- ▶ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
- ▶ Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
- ▶ Landesamt für Umwelt Brandenburg
- ▶ Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
- ▶ Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
- ▶ Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
- ▶ LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
- ▶ Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein
- ▶ Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz Brandenburg
- ▶ Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern
- ▶ Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie Sachsen-Anhalt
- ▶ Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz
- ▶ Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- ▶ Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

- ▶ Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft
- ▶ Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft
- ▶ Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
- ▶ Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz
- ▶ Umweltbundesamt
- ▶ Wasserwirtschaftsamt Donauwörth
- ▶ Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt
- ▶ Wasserwirtschaftsamt Weilheim

Kurzbeschreibung: Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von präventiven Hochwasserschutzmaßnahmen im Rahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms

Nach den verheerenden Hochwasserereignissen vom Sommer 2013 im Elbe- und Donaugebiet beschloss die Umweltministerkonferenz die Erarbeitung eines Nationalen Hochwasserschutzprogramms (NHWSP). Kernstück ist die bundesweite Aufstellung von seitens der Bundesländer geplanten prioritären, überregional wirksamen Maßnahmen des präventiven Hochwasserschutzes. Im Jahr 2020 beinhaltet das NHWSP 90 raumgebende Maßnahmen mit einer Gesamtfläche von 326 km² (Kategorie: Deichrückverlegungen, Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen) und einem Rückhaltevolumen von 1,4 Mrd. m³ (Kategorie: Flotpolder, Hochwasserrückhaltebecken).

Ziel des FuE-Vorhabens war es, die durch die gemeldeten Maßnahmen zu erwartenden Einflüsse auf die Scheitelwasserstände und den Wellenablauf von außergewöhnlichen Hochwassern zu ermitteln. Die Wirkungsanalyse befasste sich mit den drei größten deutschen Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein, in denen sich die Mehrzahl der Maßnahmen befindet. Das Vorhaben folgte einem bundesweit einheitlichen Untersuchungsansatz, der Anforderungen an die Nachweisführung sowie an die hierzu zu verwendenden Grundlagen und die eingesetzten Modellwerkzeuge (gekoppelte, hydraulische Bund-Länder-Modellsysteme) formuliert und auf andere Flussgebiete übertragbar ist.

Im Ergebnis können die NHWSP-Maßnahmen einen maßgeblichen Beitrag zur Absenkung der Scheitel von Hochwassern an den großen Strömen leisten. Er liegt für viele der modellierten Ereignisse und über weite Streckenabschnitte zwischen einem und fünf Dezimetern. Sowohl auf die Gesamtwirkung aller Maßnahmen bezogen als auch im Hinblick auf ihre Einzelwirkung zeigt das NHWSP dabei eine starke überregionale Komponente. Aus dem Vorhaben abgeleitete qualitative Merkmale für „überregionale Wirkungen“ können im NHWSP genutzt werden, um die Kriterien für die Maßnahmenauswahl/-priorisierung zu verbessern. Empfehlungen, um die Effekte der NHWSP-Maßnahmen zukünftig noch systematischer und realistischer ausweisen zu können, unterstützen Bund und Bundesländer bei der Fortschreibung und inhaltlichen Weiterentwicklung des NHWSP.

Im FuE-Vorhaben wurden drei Flussgebietsberichte (Donau-, Elbe-, Rheingebiet) und ein Synthesebericht erarbeitet.

Abstract: Investigations to determine the effects of preventive measures within the framework of the German National Flood Protection Programme

After the devastating floods in summer 2013 in the Elbe and Danube regions, the Environment Ministers' Conference decided to establish a National Flood Protection Programme (NHWSP). Its core is a nationwide list of high priority, supra-regional measures of preventive flood protection planned by the German state governments. In the year 2020, there are already recognised 90 NHWSP measures covering an area of 326 km² (dike relocations, recovery of natural retention areas) and an overall controlled retention capacity of 1.4 bn. m³ (polders, retention reservoirs).

The aim of the project was to evaluate the effects of the NHWSP measures on the peak water levels and on the flood curves for a set of extraordinary flood events. The analysis dealt with the three largest German river basins, Danube, Elbe and Rhine, in which most of the measures are located. The project followed a nationwide approach, which specified the requirements for the general methodological procedure (e.g. hydrological bases) as well as for the coupled hydraulic model systems from federal and state water management authorities. The approach can also be applied in further river basins.

The NHWSP measures can provide a significant contribution to the reduction of flood peaks in the major rivers. Flood peak reduction can reach (for many of the considered floods and for large river stretches) between one and five decimeters. In terms of the overall effect of its measures and in terms of their individual impacts, the NHWSP encloses a strong supra-regional component. Descriptive features for “supra-regional effects”, derived from the project results, can be used in the NHWSP in order to improve the criteria for the selection / prioritisation of measures. Suggestions on improving the systematic and realistic quantification of the effects of the measures will support the federal and state governments in further developing the NHWSP.

Three river basin reports (Danube, Elbe and Rhine) and one synthesis report were prepared in the project.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	11
Tabellenverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis Anhang A.....	12
Tabellenverzeichnis Anhang B.....	12
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Zusammenfassung.....	16
Summary	19
1 Einführung	22
2 Raumgebende Maßnahmen des NHWSP.....	25
2.1 Kriterien für die Maßnahmen des NHWSP	25
2.2 Gemeldete Maßnahmen in den Flussgebieten.....	26
3 Vorgehensweise und Modellierung	31
3.1 Bezugszustand, Planzustand 2027+ und Szenarien	32
3.2 Erzeugung von Modellhochwassern (Bezugszustand).....	33
3.2.1 Vorgehensweise und Definition des Begriffs „Skalierungspegel“	33
3.2.2 HQ _{mittel} und HQ _{selten} für Modellhochwasser im FuE-NHWSP	34
3.3 Verwendete Modellsysteme.....	38
3.4 Implementierung und Steuerung der NHWSP-Maßnahmen (Planzustand 2027+, Szenarien).....	42
4 Ergebnisse der Modellierung	44
4.1 Donaugebiet.....	44
4.2 Elbegebiet	47
4.3 Rheingebiet	50
5 Erkenntnisse aus der Modellierung.....	53
5.1 Vergleichbarkeit der Vorgehensweise und der Ergebnisse zwischen den Flussgebieten	53
5.2 Gesamtwirkung und Merkmale für „Überregionalität“	55
5.3 Hinweise zum Kriterium „Wirksamkeit“ für die Auswahl und Priorisierung von Maßnahmen im NHWSP	57
5.4 Möglichkeiten zur Optimierung des Untersuchungsansatzes	58
5.5 Übertragbarkeit der verwendeten Vorgehensweise auf die Flussgebiete der Oder und der Weser.....	59
6 Ausblick	61
6.1 Hydraulisch-hydrologische Nachweisrechnungen.....	61

6.2	Hochwasserrisiko	62
6.3	Synergien und integrierte Betrachtungsweise.....	62
7	Quellenverzeichnis	64
A	Im NHWSP in den Flussgebieten gemeldete DRV- und HWR-Maßnahmen.....	69
A.1	DRV-Maßnahmen.....	69
A.2	HWR-Maßnahmen	71
B	In den Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein ausgewählte Hochwasserereignisse.....	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Im NHWSP in den Flussgebieten gemeldete Maßnahmen	29
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur großräumigen Wirkungsanalyse der raumgebenden Maßnahmen des NHWSP im Rahmen des FuE-NHWSP.....	31
Abbildung 3:	Abflusslängsschnitte für das historische Hochwasser 2006 an der Elbe und vier darauf basierende Ereignisse in der Größenordnung HQ _{mittel} und HQ _{selten}	36
Abbildung 4:	Abflussganglinien der 18 im FuE-NHWSP untersuchten Hochwasser am Pegel Köln im Bezugszustand.....	38
Abbildung 5:	Das im FuE-NHWSP verwendete Bund-Länder-Modellsystem in den Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein	40
Abbildung 6:	Längsschnitte der Wasserspiegeldifferenzen an der Donau zwischen Bezugszustand und Planzustand 2027+ (alle Maßnahmen im Flussgebiet) für die 11 an der Donau modellierten Hochwasser.....	46
Abbildung 7:	Längsschnitte der Wasserspiegeldifferenzen an der Elbe zwischen Bezugszustand und Planzustand 2027+ (alle Maßnahmen im Flussgebiet) für die 18 im FuE-NHWSP modellierten Hochwasser.....	49
Abbildung 8:	Längsschnitte der Wasserspiegeldifferenzen am Rhein zwischen Bezugszustand und Planzustand 2027+ (alle Maßnahmen im Flussgebiet) für die 18 im FuE-NHWSP modellierten Hochwasser.....	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Verteilung des Volumens / der Fläche der gemeldeten HWR-Maßnahmen in / zwischen den Flussgebieten.....	26
Tabelle 2:	Übersicht über die Verteilung des Volumens / der Fläche der gemeldeten DRV-Maßnahmen in / zwischen den Flussgebieten.....	27
Tabelle 3:	Übersicht über die prozentuale Verteilung der geplanten Maßnahmenumsetzung in den Zeiträumen bis 2021, 2022- 2027 und 2027+	28
Tabelle 4:	Übersicht über die wichtigsten Parameter der Modellhochwassergenerierung im Flussgebiet Donau (Modellhochwasser an der Donau)	35
Tabelle 5:	Übersicht über die wichtigsten Parameter der Modellhochwassergenerierung im Flussgebiet Donau (Modellhochwasser am Inn).....	35

Tabelle 6:	Übersicht über die wichtigsten Parameter der Modellhochwassergenerierung im Flussgebiet Elbe.....	36
Tabelle 7:	Übersicht über die wichtigsten Parameter der Modellhochwassergenerierung im Flussgebiet Rhein	37
Tabelle 8:	Übersicht über die Berücksichtigung der Volumen- / Flächenanteile der NHWSP-Maßnahmen in den Bund-Länder-Modellsysteme	41

Tabellenverzeichnis Anhang A

Tabelle A - 1:	Gemeldete DRV-Maßnahmen im Flussgebiet Donau.....	69
Tabelle A - 2:	Gemeldete DRV-Maßnahmen im Flussgebiet Weser.....	69
Tabelle A - 3:	Gemeldete DRV-Maßnahmen im Flussgebiet Rhein	70
Tabelle A - 4:	Gemeldete DRV-Maßnahmen im Flussgebiet Elbe	71
Tabelle A - 5:	Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Weser.....	71
Tabelle A - 6:	Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Elbe	72
Tabelle A - 7:	Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Rhein.....	73
Tabelle A - 8:	Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Donau	74
Tabelle A - 9:	Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Oder.....	74

Tabellenverzeichnis Anhang B

Tabelle B - 1:	Ausgewählte HW-Ereignisse im Flussgebiet Rhein.....	75
Tabelle B - 2:	Ausgewählte HW-Ereignisse im Flussgebiet Donau	76
Tabelle B - 3:	Ausgewählte HW-Ereignisse im Flussgebiet Elbe.....	76

Abkürzungsverzeichnis

1D	eindimensional
2D	zweidimensional
ACHL	Achleiten
AK	Aken
AN	Andernach
BB	Barby (nur Abb. 3 und 7) bzw. Brandenburg
BE	Berlin
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BHQ	Bemessungsabfluss
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BN	Bonn
BR	Breisach
BRH	Bundesrechnungshof
BS	Basel
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
DD	Dresden
DEGG	Deggendorf
DILL	Dillingen
DKKV	Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V.
DONA	Donauwörth
DRV	NHWSP-Maßnahmenkategorie „Deichrückverlegung / Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen“
DÜ	Düsseldorf
EG HVal	Expertengruppe „Validierung“ der IKSR
EM	Emmerich
ENGE	Engelhartszell
eNHWSP	webbasierte Koordinierungsplattform "Elektronisches Informationssystem Nationales Hochwasserschutzprogramm"
FGG	Flussgebietsgemeinschaft
FKZ	Forschungskennzahl
FuE-NHWSP	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben "Analyse der Wirkung von Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms"
GAK	Gemeinschaftsaufgabe zur Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes
Gottl.	Gottleuba
GÜNZ	Günzburg

Havel N.	Havel (Zufluss über Neuwerben)
HB	Hansestadt Bremen
HE	Hessen
HH	Hansestadt Hamburg
HN	hydrodynamisch-numerisch
HOFK	Hofkirchen
HQ	Hochwasserabfluss [m^3/s]
HQ_T	Scheitelabfluss, der in einer längeren Reihe von aufeinander folgenden Jahren in der Zeitspanne von T Jahren einmal erreicht oder überschritten wird
HSK	Hochwasserstudienkommission
HW	Scheitelwasserstand / Hochwasser
HWR	NHWSP-Maßnahmenkategorie „gesteuerte Hochwasserrückhaltung“ (in Flutpoldern oder Hochwasserrückhaltebecken)
H(W)RB	Hochwasserrückhaltebecken
HWS	Hochwasserschutz
Hydro_AS-2D	hydrodynamisch-numerische Software für die 2D-Simulation
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
INGO	Ingolstadt
IRP	Integriertes Rheinprogramm
KA	Kaub
KELH	Kelheim
KK	Kehl-Kronenhof
KÖ	Köln
LARSIM	Large Area Runoff Simulation Model (Wasserhaushaltsmodell)
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LfU	Landesamt für Umwelt
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
LW	Lutherstadt Wittenberg
MD	Magdeburg-Strombrücke
MV	Mecklenburg-Vorpommern
MX	Maxau
MZ	Mainz
ND	Neu Darchau
NHWSP	Nationales Hochwasserschutzprogramm des Bundes und der Länder
NI	Niedersachsen
NULM	Neu-Ulm
NW	Nordrhein-Westfalen
PFEL	Pfelling

Q	Abfluss [m^3/s]
RE	Rees
RHR	Rückhalteraum
RP	Rheinland-Pfalz
RU	Ruhrort
SC	Schöna
SCHW	Schwabelweis
SH	Schleswig-Holstein
SK	Ständige Kommission für den Ausbau des Rheins zwischen Kehl/Strasbourg und Neuburgweier/Lauterbourg
SL	Saarland
SN	Sachsen
SOBEK	eindimensionale, hydrodynamisch-numerische Simulationssoftware
SRP	Sonderrahmenplan
ST	Sachsen-Anhalt
STRA	Straubing
SwE	Schwarze Elster
SYNMOD	synoptisches Modell
TA	Tangermünde
Teilmaß.	Teilmaßnahme
TG	Torgau
TH	Thüringen
TLUBN	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
TU	Technische Universität
UAG	Unterarbeitsgruppe
UBA	Umweltbundesamt
UMK	Umweltministerkonferenz
Ums.	Umsetzung
Verbundmaß.	Verbundmaßnahme
VGF	Vergrößerungsfaktor
VILS	Vilshofen
VV	Vollversammlung
WB	Wittenberge
WE	Wesel
Weiß.	Weißeritz
WO	Worms
WWA	Wasserwirtschaftsamt

Zusammenfassung

Erkenntnisse aus den Arbeiten des Forschungsvorhabens

Das Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) beinhaltet im Jahr 2020 90 raumgebende Maßnahmen in fünf Flussgebieten mit einer Gesamtfläche von 326 km² (Kategorie DRV: Deichrückverlegungen, Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen) und einem gesteuert einsetzbaren Rückhaltevolumen von 1,4 Mrd. m³ (Kategorie HWR: Flutpolder, Hochwasserrückhaltebecken). Davon entfällt mit 84 Maßnahmen die Mehrzahl auf die Flussgebiete von Donau, Elbe und Rhein, für die im Forschungsvorhaben (FuE-NHWSP) mit gekoppelten Modellsystemen die überregionalen Auswirkungen auf die Scheitel und die Wellenabläufe eines Kollektivs außergewöhnlicher, überwiegend „mittlerer“ und „seltener“ Hochwasser untersucht wurden.

Die Maßnahmen der Bundesländer im NHWSP können einen maßgeblichen großräumigen Beitrag zur Absenkung der Scheitel von Hochwassern an den großen Strömen leisten.

Die im NHWSP gemeldeten Maßnahmen der Bundesländer können an den Hauptströmen Donau (inkl. Inn), Elbe und Rhein für eine maßgebliche Reduktion der Hochwasserscheitel über die gesamte, durch Maßnahmen beeinflussbare Strecke sorgen. Die Wirkungen liegen (für viele der analysierten Hochwasser und über weite Streckenabschnitte) zwischen einem und fünf Dezimetern und können bei einzelnen Hochwassern bzw. an einzelnen Gewässerstandorten bzw. -abschnitten zudem deutlich größer sein, wenn hydrologische bzw. hydraulisch-morphologische Gegebenheiten dies befördern.

Die NHWSP-Maßnahmen außerhalb der Hauptströme / im Einzugsgebiet zeigen überwiegend an den Nebenflüssen bedeutende Auswirkungen auf deren Hochwasserscheitel.

Die im NHWSP gemeldeten Maßnahmen der Bundesländer an den Nebengewässern können die Hochwasserscheitel der großen Ströme überwiegend nicht oder nur in geringem Ausmaß beeinflussen (wenige cm). Für zahlreiche Maßnahmen wurde allerdings gezeigt, dass sie an den Nebenflüssen beträchtliche (mehrere Dezimeter) und großräumige (auf mehreren 10 km bis zu 100 km) scheitelreduzierende Wirkungen hervorrufen können.

Sowohl bezogen auf die Gesamtwirkung aller NHWSP-Maßnahmen als auch im Hinblick auf ihre Einzelwirkung zeigt das NHWSP eine starke überregionale Komponente.

In ihrer Gesamtwirkung zeigen die NHWSP-Maßnahmen in allen drei untersuchten Flussgebieten eine deutliche überregionale Wirksamkeit, die bis zur Staats- bzw. Tidegrenze reichen kann. Der Wirkungsreichweite von raumgebenden Maßnahmen auf Hochwasserscheitel können an einem Gewässer ereignis- oder gewässernetzbezogen dann Grenzen gesetzt sein, wenn beispielsweise ein seitlicher Zufluss einem Gewässer einen neuen Wellenscheitel aufprägt und eine Oberstrom eingesetzte Maßnahme nun nicht mehr im Scheitelbereich eines Hochwassers wirkt. Zahlreiche Maßnahmen des NHWSP beweisen ihren überregionalen Charakter auch, indem sie aufgrund ihres gewählten Standorts oder dem vorgesehenen Einsatzkonzept solchermaßen „begrenzte“ Wirkbereiche erweitern. Vorwiegend im Nahbereich wirkende Maßnahmen können einen Beitrag für den überregionalen Hochwasserschutz leisten, wenn sie maßgeblicher Bestandteil einer auf großräumige Wirkungen abzielenden Bewirtschaftungsstrategie sind, in der Maßnahmen verschiedenen Typs effizient miteinander kombiniert werden. Dementsprechend müssen überregionale Maßnahmen(wirkungen) nicht

zwangsläufig mit Effekten am bzw. auf den Hauptstrom verbunden sein, sondern können auch an den Nebengewässern im Einzugsgebiet auftreten.

Das für die Auswahl und Priorisierung von Maßnahmen im NHWSP genutzte Kriterium **Wirksamkeit** kann um die zuvor genannten Aspekte ergänzt (siehe vorheriger Abschnitt) und präzisiert werden (siehe unten).

Im FuE-NHWSP lag der Fokus auf den Maßnahmenwirkungen im Verbund, wodurch v. a. Erkenntnisse über die *Wirkzusammenhänge* der Maßnahmen der Bundesländer im NHWSP gewonnen wurden. DRV-Maßnahmen weisen i. d. R. signifikante Wasserstandsreduktionen im Bereich der Maßnahme und in einem Bereich oberstrom davon auf. DRV-Maßnahmen können dann großräumige Effekte erzielen, wenn sich die Wirkungen von Teilmaßnahmen eines Verbunds unmittelbar aneinander anschließen bzw. überlagern oder ihr Retentionsvolumen einen beträchtlichen Teil des Volumens der Hochwasserwelle ausmacht. Großräumige Scheitelreduktionen, auch des Abflusses, sind jedoch eher an den Einsatz gesteuerter Hochwasserrückhaltemaßnahmen (HWR) gekoppelt. Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann bei gesteuerten HWR-Maßnahmen von einer signifikanten Wirkung auf die unterstrom ablaufende Hochwasserwelle mindestens bis zur Einmündung des nächsten, hydrologisch bedeutsamen Nebenflusses ausgegangen werden. Verlässliche darüber hinaus reichende Wirkungen können sich dann ergeben, wenn die typischen Hochwassergesetze ein günstiges Aufeinandertreffen von Hochwasserwellen und Maßnahmenwirkungen bedingen oder die Kriterien für den Maßnahmeneinsatz eine spezielle, überregionale Komponente besitzen.

Um die Effekte der NHWSP-Maßnahmen noch systematischer und realistischer auszuweisen, sollte der Untersuchungsansatz kontinuierlich optimiert werden.

Der Betrieb von gekoppelten Modellsystemen sollte mit regelmäßigen Aktualisierungen und Verbesserungen einhergehen. Durch eine räumliche Erweiterung des Modellsystems können bisher noch nicht modellierte und neu gemeldete Maßnahmen berücksichtigt werden. Zusätzliche Szenarien weiterer Hochwassergesetze erhöhen die Vielfalt der analysierten Wellenabläufe. Mit einer größeren Bandbreite an untersuchten Scheitelabflüssen und Wellenvolumina können die verschiedenen Wirkungen der gemeldeten Maßnahmen in den Modellierungen besser dargestellt werden. Insbesondere die Auswirkungen der gesteuerten Maßnahmen können noch realitätsnäher quantifiziert werden, wenn mit fortschreitender Maßnahmenplanung auch – wo noch erforderlich – (überregionale) Einsatz- und Steuerungskonzepte konkretisiert werden. Diese könnten in den Modellierungen die bisherige, zum Teil ereignisbezogene Maßnahmensteuerung mit Annahme der vollständigen Kenntnis einer Hochwasserwelle ersetzen, auf Basis derer sich realistische (hinsichtlich der gewählten Einsatzkriterien), aber idealisierte (Kenntnis des gesamten Hochwasserverlaufs) Scheitelreduktionen für die untersuchten Hochwasser ausweisen lassen.

Die Dokumentation der Ergebnisse kann dem Bund und den Bundesländern wichtige Hinweise für den effizienten Einsatz der Ressourcen im NHWSP liefern. Die BfG wird das BMU und die Bundesländer zukünftig dabei unterstützen, das NHWSP fortzuschreiben und inhaltlich weiterzuentwickeln.

Die begleitenden Arbeiten zum NHWSP können dazu beitragen, die positiven Wirkungen der raumgebenden Maßnahmen der Bundesländer im NHWSP in ihrer fortgesetzten Entwicklung und Umsetzung bedarfsgemäß zu dokumentieren. Schlussfolgerungen hieraus können wichtige Hinweise für den effizienten Einsatz der Ressourcen des NHWSP geben. Darüber hinaus kann die fachliche Begleitung weitere Beiträge liefern, um das Hochwasserrisikomanagement, für das

das NHWSP ein wichtiger Baustein ist und dessen Umsetzung in den Flussgebieten in der Verantwortung der Bundesländer liegt, fortzuentwickeln. Die Änderung grundsätzlicher (bspw. hydrologischer oder sozioökonomischer, ggf. internationaler) Rahmenbedingungen in den Flussgebieten kann zudem Anlass für eine Fortschreibung der Nachweisrechnungen sein. Dabei kann es hilfreich sein, die Komponente des Hochwasserrisikos zu berücksichtigen, u. a. um den wirtschaftlichen Gesamtnutzen des NHWSP zu quantifizieren und das Programm im Spannungsfeld gegensätzlicher gesellschaftlicher Interessen langfristig zu rechtfertigen. Das NHWSP legt darüber hinaus bewusst Wert auf die Nutzung von naturschutzfachlichen, klimawandelbezogenen und gewässerökologischen Synergien und dokumentiert damit den eingeschlagenen Pfad von einer rein sektoralen hin zu einer stärker integrierten Betrachtung von raumgebenden Maßnahmen des Hochwasserschutzes.

Eine Fortführung des mit dem NHWSP eingeschlagenen Wegs entspricht den wachsenden gesellschaftlichen Ansprüchen, die ein sektoren- und interessenübergreifendes Bewertungssystem als Bestandteil einer integrierten Daseinsvorsorgeplanung in Deutschland erfordern.

Summary

Findings from the NHWSP research project

After the disastrous flood events of June 2013 in the German Elbe and Danube catchments, the German federal and state governments established, first time together, a nationwide joint flood protection programme (NHWSP). The programme supports responsible authorities in realisation of high priority "Room for the River"-flood protection measures. In the year 2020 there are already recognised 90 NHWSP measures covering an area of 326 km² (category DRV: dike relocations, recovery of natural floodplains) and an overall controlled retention capacity (category HWR: retention reservoirs, polders) of 1.4 bn. m³ in five German river basins. With 84 measures, the majority will be implemented in the river basins of the Danube, Elbe and Rhine. In the accompanying research project, extensive sets of coupled numerical, mainly hydraulic, models were put together by the Federal Institute of Hydrology (BfG) and the state water management authorities in order to evaluate the supra-regional effects of the programme on flooding processes and flood peak reduction. A set of extraordinary flood events showing a "medium" or "low" probability were analysed for that purpose.

The NHWSP measures can provide a significant large-scale contribution to the reduction of flood peaks in the major rivers.

The NHWSP measures – developed and implemented into the programme by the German federal states – can ensure a significant reduction the flood peaks of the Danube (incl. Inn), Elbe and Rhine main rivers over the entire river segments influenced by the measures. Flood peak reductions can reach (in case of the considered set of floods and for large river stretches) between one and five decimeters. If hydrological or hydraulic-morphological conditions are favourable in specific river sections or locations or for specific flood events, water level reductions can be significantly higher.

NHWSP measures that are not located in the major rivers but in the sub-catchment area, mainly have significant effects on the flood peaks at the tributaries.

Predominantly small or limited impact on the flood peaks of the main watercourses (by at most a few centimetres) have been identified for the NHWSP measures that are planned in their tributaries. However, modelling results show that many measures have significant reductions (several decimeters) covering large sections (several tens to hundred(s) of kilometre(s)) on their tributaries.

The NHWSP encloses a strong supra-regional component both in terms of the overall effect of its measures and in terms of their individual impacts.

The modelling results for the three river basins in the current study confirm an overall benefit of the NHWSP programme, causing supra-regional impacts on flood peaks in the main watercourses reaching the national borders or tidal limits. The range of the effects on flood peaks on a river stretch due to the measures can be limited by the features of the river network or the special characteristics of a single flood event. For example, the flood wave of a tributary can form a new (and even higher) flood peak in a major river in such a way, that peak reductive effect caused by flood retention measures in the upstream region of the major river is no longer at the new flood peak. Numerous measures in the NHWSP are able to expand their effectiveness above such limited ranges (e.g. due to their location or by means of a suitable management plan) and therefore fulfil their supra-regional specification. Measures with a shorter range focus can

also contribute to the supra-regional flood protection if they are a significant part of a large-scale management strategy where flood protection measures of different types are combined in an efficient way. Accordingly, supra-regional impacts of flood retention measures are not necessarily connected with effects on the major watercourses – they can also occur in the tributaries in the catchment area.

The criterion “effectiveness” that is used for the selection and prioritization of measures in the NHWSP can be supplemented by the aforementioned aspects (see above) and further specified (see below).

The NHWSP research project focused on the overall effects of the network of combined measures and therefore obtains new findings especially about the interrelationships and interaction of the measures. In general, DRV-measures cause significant water level reductions on-site and in a specific upstream river stretch. They can achieve large-scale effects if the impacts of sub-measures in a network directly adjoin or superimpose one another or if their retention volume makes up a considerable part of the flood wave volume. However, large scale impacts on flood peaks, especially on flood discharges, are more likely to be linked to controlled flood retention measures (HWR). With a high degree of probability, HWR measures can be assumed to have a significant effect on the flood wave downstream – at least up to the confluence of the next, hydrologically important tributary. Reliable effects that go beyond those confluences can arise if typical flood formation processes lead to an advantageous combination of flood waves or flood reduction effects and in the cases where there are flood management criteria taking especially into account supra-regional goals.

In order to further improve the systematic and realistic quantification of the effects of the NHWSP measures, the research approach should be continuously optimized.

The operation of coupled model systems should be accompanied by regular updates and improvements. By spatial expansion of the model system, previously not modelled and newly reported measures should be taken into account. Additional hydrological scenarios for further floods increase the variety of the analysed flood wave types. With a wider range of examined peak discharges and wave volumes, the various effects of the NHWSP measures can be more differentially represented in the modelling. In particular, the effects of the controlled retention measures can be quantified more realistically, if – as necessary – (supra-regional) deployment and control concepts are concretised as the planning of measures progresses. In the modelling, those concepts could replace the previously implemented, (partly) flood specific control of measures. Based on this assumption, which takes into account the knowledge of the complete flood course, realistic (with regard to the selected flooding criteria) but idealized (knowledge of the entire flood course) peak reductions can be identified for the investigated floods.

The documentation of the results can provide both the federal and state governments with important information for the efficient use of resources in the NHWSP. In future, the BfG will support the Federal Ministry for the Environment and the federal states in updating and further developing the NHWSP.

The accompanying work on the NHWSP can help to document the positive effects of the NHWSP measures in their ongoing development and implementation as required. Conclusions from this can provide important information for the efficient use of the resources of the NHWSP. In addition, the scientific support can make contributions to the further development of flood risk management, for which the NHWSP is an important component and whose implementation in the river basins is the responsibility of the federal states. A change in fundamental (e.g.

hydrological or socio-economic, or even international) framework conditions in the river basins can also be the reason for updating the model-based analyses. It can be helpful to consider the flood risk component, amongst other aspects in order to quantify the overall economic benefit of the NHWSP and to legitimate the programme in the long term in the field of conflicting social interests. The NHWSP also consciously attaches importance to the use of nature conservation, climate change-related and water-ecological synergies and thus documents the path taken from a purely sectoral to a more integrated consideration of spatial measures of flood protection.

The continuation of the path taken with the NHWSP corresponds to the growing public demands that require a cross-sectoral assessment system (taking into account the needs of all stakeholders) as part of integrated civil services planning in Germany.

1 Einführung

Große Flusshochwasser sind wiederkehrende Naturereignisse, deren Auftreten nicht verhindert werden kann. Allerdings lassen sich schwerwiegende Folgen von Hochwassern, wie denen im Sommer 2013 im Elbe- und im Donaugebiet (BfG 2014), durch ein gut koordiniertes und länderübergreifendes Risikomanagement abmildern. Unmittelbar nach den verheerenden Ereignissen vom Juni 2013 beschloss die Umweltministerkonferenz (UMK) in einer Sondersitzung am 2. September 2013 die Erarbeitung eines Nationalen Hochwasserschutzprogramms (NHWSP). Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat daraufhin anhand abgestimmter Kriterien für die LAWA-Sondersitzung am 29. September 2014 eine Liste mit prioritären, überregional wirksamen Hochwasserschutzmaßnahmen erarbeitet, die das Kernstück des NHWSP bildet (LAWA 2014). Das NHWSP wurde auf der UMK am 24. Oktober 2014 beschlossen (BMU 2019).

Zum ersten Mal gibt es damit eine bundesweite Aufstellung mit den seitens der Bundesländer geplanten, vordringlichen Maßnahmen für den präventiven Hochwasserschutz. Über den im Jahr 2015 gestarteten Sonderrahmenplan (SRP) „Maßnahmen des präventiven Hochwasserschutzes“ der „Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz“ (GAK) werden insbesondere raumgebende Maßnahmen zur Schaffung von gesteuerten (Flotpolder, Hochwasserrückhaltebecken; Kategorie HWR) und ungesteuerten Rückhalteräumen (Deichrückverlegungen, Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen; Kategorie DRV) mit signifikanter überregionaler Wirkung auf Hochwasser zu 60 % mit Bundesmitteln gefördert. Seit 2016 stellt der Bund für das NHWSP über den SRP jährlich Mittel in Höhe von 100 Mio. Euro bereit. Die dritte Maßnahmenkategorie des NHWSP, die Beseitigung von Schwachstellen, wird nicht über den SRP, sondern von den Bundesländern eigenverantwortlich über EU-, Landes- oder Bundesmittel (bspw. über Förderbereiche der „allgemeinen“ GAK) finanziert.

Zur Identifikation und Priorisierung der raumgebenden Maßnahmen hat die LAWA beginnend im Herbst 2013 Kriterien und Bewertungsmaßstäbe entwickelt (LAWA 2014a). Es gelten die Kriterien „Wirksamkeit“ und „Synergien“ sowie das Zusatzkriterium „Umsetzbarkeit“ (Kap. 2.1). Ins Programm aufgenommen werden lediglich Vorhaben, die einzeln oder als Verbundmaßnahme die zusätzlich aufgestellten „Abschneidekriterien“ (d.h. Mindestgrößen) erfüllen – gesteuerte Flotpolder müssen ein Rückhaltevolumen von mindestens 5 Mio. m³, Hochwasserrückhaltebecken von mehr als 2 Mio. m³ besitzen und Deichrückverlegungsmaßnahmen bzw. Maßnahmen zur Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen eine Mindestgröße an zurückgewonnener Fläche von 100 ha aufweisen.

Die NHWSP-Maßnahmenliste wird jährlich mittels Beschluss der LAWA-Vollversammlung (LAWA-VV) aktualisiert (z. B. bzgl. Umsetzbarkeit, Kostenansätzen, Umsetzungszeiträumen) und fortgeschrieben. Dabei können auch neue Maßnahmen der Bundesländer über die Flussgebietsgemeinschaften (FGGen) eingebracht werden. Das NHWSP beinhaltet im Jahr 2020 90 Maßnahmen in fünf Flussgebieten (Donau, Elbe, Oder, Rhein und Weser) mit einer Gesamtfläche von 326 km² (Kategorie DRV) und einem gesteuert einsetzbaren Rückhaltevolumen von 1,4 Mrd. m³ (Kategorie HWR). Mit insgesamt 84 Maßnahmen entfällt die Mehrzahl auf die Flussgebiete Donau, Elbe und Rhein (BfG 2020; Kap. 2.2).

Das NHWSP hat den Anspruch, mehr als nur eine Liste von Maßnahmen zu sein. Es greift, u. a. durch die Gesamtausrichtung des Programms und dem Ziel der Förderung überregional wirksamer Maßnahmen, wesentliche Interessenskonflikte im Kontext der Planung und Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen (bspw. Flächenintensität, Mittelkonkurrenz etc.) auf, unterstützt somit das Solidaritätsprinzip zwischen Ober- und Unterliegern in den Flussgebieten und fördert darüber hinaus den bundesweiten fachlichen Wissens- bzw.

Erfahrungsaustausch (siehe bspw. LAWA 2014b, LAWA 2014c). Wichtigstes Ziel des NHWSP ist es, zusammenhängend über ein Flussgebiet betrachtet, geeignete Maßnahmen so auszuwählen und zu kombinieren, dass möglichst viele Menschen von ihnen profitieren. Schäden künftiger Hochwassereignisse sollen reduziert und damit auch Aufwendungen für milliardenschwere Wiederaufbauprogramme verringert werden (BMU 2019).

Bereits im Frühjahr 2014 hatte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) mit einer Vorprüfung der von den Bundesländern für das NHWSP gemeldeten Maßnahmen hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Wirkweisen auf Hochwasser betraut (BfG 2014a, BfG 2016). Auf Grundlage dieser Vorstudie erfolgte dann im Sommer 2015 durch das Umweltbundesamt (UBA) die Beauftragung der BfG zur weiteren wissenschaftlichen Begleitung des NHWSP im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Analyse der Wirkung von Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“ (kurz: FuE-NHWSP; FKZ 3715 21 211 0). Ziel des FuE-NHWSP war es in erster Linie – als Erweiterung zu den bis 2016 durchgeföhrten Vorstudien – für eine größere Auswahl an außergewöhnlichen Hochwassern die zu erwartenden hydrologisch-hydraulischen Wirkungen der in den Flussgebieten gemeldeten Maßnahmen (d. h. deren Einfluss auf Scheitelwasserstände und Wellenablauf) mittels großräumiger gekoppelter Modelle zur Abfluss- und Wasserstandssimulation zu ermitteln.

Die Wirkungsanalyse der Maßnahmen befasst sich aus Kapazitätsgründen zunächst nur mit den drei größten deutschen Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein und wurde gemeinsam von der BfG und den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer durchgeführt. Das Vorhaben folgte einem bundesweit einheitlichen Untersuchungsansatz, der Anforderungen an die Nachweisführung sowie an die hierzu zu verwendenden hydrologischen Grundlagen und eingesetzten Modellierungswerkzeuge formuliert. Die gewählte Vorgehensweise soll zwar den einzelnen Flussgebietscharakteristika gerecht werden, dabei aber vergleichbar zwischen und übertragbar auf andere Flussgebiete bleiben (Schuh & Schmid 2018). Das FuE-NHWSP fokussiert somit – zusätzlich zu den ggf. von den (internationalen) Flussgebietsgemeinschaften, einzelnen Bundesländern oder Maßnahmenträgern auf Flussgebietsebene (oder darunter) erstellten Wirksamkeitsnachweisen – auf die bundesweite Betrachtungsebene.

Das FuE-Vorhaben wurde von einem Projektbeirat und regelmäßigen Arbeitstreffen auf Flussgebietsebene (sogenannten „Flussgebietsgesprächen“) begleitet. Es ist vorgesehen, die Ergebnisse und Empfehlungen des FuE-NHWSP in der LAWA vorzustellen und so ihre Berücksichtigung im Rahmen der regelmäßigen Fortschreibung des NHWSP zu ermöglichen. Das Forschungsvorhaben kann Bund und Bundesländern wesentliche Informationen für einen effizienten Einsatz der Mittel für einen überregionalen Hochwasserschutz liefern. Darauf basierend ist es möglich, das Programm weiterzuentwickeln und den Bund in seiner Koordinierungsfunktion bei der Umsetzung des NHWSP zu unterstützen.

Der vorliegende **Synthesebericht** fasst die im FuE-NHWSP in den drei untersuchten Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein gebietsspezifisch gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen zusammen und bewertet diese im Hinblick auf flussgebietsübergreifende Aspekte. Eine ausführliche Dokumentation der flussgebietsbezogenen Arbeiten wird in den drei **Flussgebietsberichten** für Donau (Schuh et al. 2021), Elbe (Hatz & Reeps 2021) und Rhein (Hatz et al. 2021) vorgenommen. Die Kernaussagen dieser Berichte werden zusammengefasst und auszugsweise in den Kapiteln 2 bis 4 des Syntheseberichts präsentiert. Die Übersicht zu den Maßnahmen der Bundesländer im NHWSP (Kap. 2), die Erläuterung des bundesweiten Untersuchungsansatzes (Kap. 3) und die Ergebnisse der modellbasierten Wirkungsanalysen in den Flussgebieten (Kap. 4) bilden die Grundlage, um nachfolgend in Kapitel 5 in einer Synthese die Erkenntnisse aus den Modellierungen zu beschreiben (u. a. im Hinblick auf Vergleichbarkeit,

Übertragbarkeit und Optimierung der Vorgehensweise, auf ein gemeinsames Verständnis von „Überregionalität“ und auf die fachliche Einordnung der derzeit im NHWSP verwendeten Auswahl- und Priorisierungskriterien). Kapitel 6 liefert einen Ausblick und zeigt Optionen für die Fortschreibung und Weiterentwicklung der fachlichen Begleitung des NHWSP auf, die dazu beitragen können, das NHWSP noch besser „als dauerhaften Beitrag zur Daseinsvorsorge“ (UMK 2013) zu etablieren. Dem einführenden Kapitel 1 vorangestellt finden sich die zusammenfassend formulierten „Erkenntnisse aus den Arbeiten zum FuE-NHWSP“.

2 Raumgebende Maßnahmen des NHWSP

Neben dem primären Ziel des präventiven Hochwasserschutzes legt das NHWSP ganz bewusst Wert auf die Nutzung von Synergien mit der Gewässerentwicklung, der Anpassung an den Klimawandel und dem Naturschutz und will somit auch die Auenentwicklung in Deutschland voranbringen (Buschhüter et al. 2018). Mit der überwiegenden Anzahl an raumgebenden Maßnahmen im NHWSP wird deshalb das Ziel verfolgt, ehemalige Überschwemmungsflächen in eingedeichten Flussabschnitten wieder am Abflussgeschehen teilnehmen zu lassen. Die raumgebenden Maßnahmen des NHWSP werden in die beiden Typ-Kategorien „Deichrückverlegung / Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen“ (DRV) und „gesteuerte Hochwasserrückhaltung“ (durch Flotpolder und Hochwasserrückhaltebecken; HWR) unterteilt (Kap. 2.1).

Die vorgenommene Unterteilung gibt einen ersten Anhaltspunkt zur Wirkweise der gemeldeten Maßnahmen. Aus gesteuerten Hochwasserrückhaltungen im Nebenschluss (Flotpolder) oder im Hauptschluss (Hochwasserrückhaltebecken) resultiert durch Entnahme oder Zurückhaltung von Wasser eine Abflussminderung und damit auch eine Wasserstandsminderung vor Ort und auf der Gewässerstrecke stromabwärts. Ungesteuerte Deichrückverlegungsmaßnahmen, die mit einer Vergrößerung des Fließquerschnitts einhergehen, bewirken typischerweise eine Wasserstandsabsenkung am Ort der Maßnahme, die je nach hydraulischen Verhältnissen eine mehr oder weniger lange Strecke nach oberstrom fortwirkt. Allerdings bestehen zwischen den Maßnahmen innerhalb der Kategorien weitere deutliche Unterschiede hinsichtlich der Wirkungsweisen, die bspw. von den Bemessungsfällen bzw. Einsatzkriterien, dem Zusammenspiel mit anderen Maßnahmen oder der geplanten baulichen Umsetzung abhängen. Ausführlichere Erläuterungen hierzu finden sich in den drei Flussgebietsberichten zum FuE-NHWSP (Hatz & Reeps 2021, Hatz et al. 2021, Schuh et al. 2021).

2.1 Kriterien für die Maßnahmen des NHWSP

Zur Identifizierung von raumgebenden Maßnahmen für das NHWSP werden die Kriterien **Wirksamkeit** und **Synergien** sowie das Zusatzkriterium **Umsetzbarkeit** herangezogen. Das Kriterium Wirksamkeit wird über die Anzahl der durch die Maßnahmen bei HQ_{extrem/selten} bevorteilten Einwohner unterstellt, die Synergien können bei Deichrückverlegungen an der Fläche der zurückgewonnenen rezenten Aue bzw. bei gesteuerten Maßnahmen an der Möglichkeit ökologischer Flutungen festgemacht werden (LAWA 2015). Ins Programm aufgenommen werden nur Vorhaben, die einzeln oder als Verbundmaßnahme die zusätzlich aufgestellten, volumen- bzw. flächenabhängigen „Abschneidekriterien“ (> 2 Mio. m³ bzw. >5 Mio. m³ oder >100 ha, vgl. Kap. 1) erfüllen.

Die Priorisierung der Maßnahmen richtet sich ebenfalls nach den vereinbarten Bewertungskriterien. Bei vergleichbarer Wirksamkeit und Umsetzungsreife kommt den Synergien eine wichtige Bedeutung zu (LAWA 2014a, LAWA 2015), bspw. wird bei Deichrückverlegungen mit steigender Flächengröße von einer Zunahme der Synergien ausgegangen. Die festgelegten Kriterien und Bewertungsmaßstäbe ermöglichen nach LAWA (2014a) eine deutschlandweite Auswahl prioritärer Maßnahmen mit überregionaler Bedeutung, eine einfache Handhabbarkeit des Auswahlverfahrens sowie Transparenz und Nachvollziehbarkeit in der Entscheidungsfindung. Möglichkeiten zur Verbesserung und Präzisierung dieser Kriterien (und ihrer Berechnungsrandbedingungen) werden auf Grundlage der Ergebnisse des FuE-NHWSP in Kapitel 5.2 und 5.3 aufgezeigt.

2.2 Gemeldete Maßnahmen in den Flussgebieten

Im Jahr 2020 beinhaltet das NHWSP insgesamt **90 Maßnahmen** in fünf Flussgebieten (Donau, Elbe, Oder, Rhein und Weser) mit einer Gesamtfläche von **326 km²** (ungesteuerte Maßnahmen) und einem gesteuert einsetzbaren Rückhaltevolumen von **1,4 Mrd. m³**. Mit insgesamt 84 Maßnahmen entfällt die Mehrzahl auf die Flussgebiete Donau, Elbe und Rhein.

Die im Bundesgebiet gemeldeten Maßnahmen der Bundesländer im NHWSP sind in einer Übersichtskarte in Abbildung 1 dargestellt¹. Darüber hinaus enthalten im Anhang A die Tabellen A-1 bis A-4 (DRV) und A-5 bis A-9 (HWR) aus der Koordinierungsplattform „Elektronisches Informationssystem Nationales Hochwasserschutzprogramm“ (eNHWSP; Hydrotec 2017) entnommene Angaben, die für jede Maßnahme wichtige Informationen wie die Lage im Flussgebiet (Gewässer, Bundesland) oder die Flächengröße bzw. das Maßnahmenvolumen vermitteln. Ebenfalls angegeben ist ggf. der Status als Verbundmaßnahme, die jeweils aus einer unterschiedlichen Anzahl an Einzelmaßnahmen bestehen kann. Informationen über die geplante Fertigstellung der Maßnahmen sind in drei Zeitscheiben (bis 2021, bis 2027, 2027+) in Orientierung an die Zyklen der Umsetzung der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie angegeben (BfG 2020). Die Tabellen 1, 2 und 3 fassen diese wichtigsten Kennwerte zu den gemeldeten Maßnahmen flussgebietsweise zusammen.

Tabelle 1: Übersicht über die Verteilung des Volumens / der Fläche der gemeldeten HWR-Maßnahmen in / zwischen den Flussgebieten

Flussgebiet	Gesamt-volumen [Mio. m ³]	Anteil am Gesamt-volumen im NHWSP [%]	Anteil der Maßnahmen am Hauptgewässer im Flussgebiet [%]	Anteil der Maßnahmen an den Nebengewässern im Flussgebiet [%]
Donau	225,2	16,1	67,5	32,5
Elbe	825,2	59,0	38,0	62,0
Oder	113,0	8,1	100,0	0,0
Rhein	232,4	16,6	86,7	13,3
Weser	2,1	0,2	0,0	100,0
NHWSP (gesamt)	1397,9	-	55,8	44,2

Quelle: Daten: BfG 2020

Im **Flussgebiet Donau** sind im Jahr 2020 23 Maßnahmen im NHWSP aufgenommen – 17 gesteuerte (HWR) und 6 ungesteuerte (DRV) Vorhaben, die zusammen ein Gesamtvolumen von 225,2 Mio. m³ (HWR) und eine Fläche von 21,67 km² (DRV) aufweisen. Der größere Teil der Maßnahmen ist an der Donau selbst vorgesehen; rund ein Drittel des zu schaffenden gesteuerten Rückhaltevolumens sowie rund 40 % der zurückgewonnenen ungesteuerten Retentionsfläche sollen an den Nebenflüssen im Einzugsgebiet realisiert werden. 6 der 23 umzusetzenden Vorhaben sind sogenannte Verbundmaßnahmen.

20 gesteuerte (HWR) und 9 ungesteuerte (DRV) Vorhaben und somit insgesamt 29 Maßnahmen (davon 6 Verbundmaßnahmen) sind aktuell im **Flussgebiet Elbe** im NHWSP gemeldet. Sie besitzen zusammen ein Gesamtvolumen von 825,2 Mio. m³ (HWR) und eine Fläche von 250,11 km² (DRV). 511,8 Mio. m³ des gemeldeten Rückhaltevolumens befinden sich an

¹ Für die drei im Rahmen des FuE-NHWSP bearbeiteten Flussgebiete finden sich detailliertere Kartendarstellungen in den jeweiligen Flussgebietsberichten.

Nebenflüssen der Elbe, wovon sich 75 % auf bereits vorhandene und im Rahmen des NHWSP zu optimierende Rückhalteräume bezieht. Der mit 234,87 km² überwiegende Anteil der ungesteuerten Maßnahmen befindet sich ebenfalls an den Nebenflüssen. Die DRV-Maßnahmen an der Schwarzen Elster und der Unstrut/Gera (siehe lfd. Nr. g, h und i in Tab. A-4) haben an der zuvor genannten Fläche einen Anteil von mehr als 90 %.

Tabelle 2: Übersicht über die Verteilung des Volumens / der Fläche der gemeldeten DRV-Maßnahmen in / zwischen den Flussgebieten

Flussgebiet	Gesamtfläche [ha]	Anteil an der Gesamtfläche im NHWSP [%]	Anteil der Maßnahmen am Hauptgewässer im Flussgebiet [%]	Anteil der Maßnahmen an den Nebengewässern im Flussgebiet [%]
Donau	2167	6,6	58,6	41,4
Elbe	25011	76,7	6,1	93,9
Oder	0	-	-	0,0
Rhein	4887	15,0	34,3	65,7
Weser	532	1,6	0,0	100,0
NHWSP (gesamt)	32597	-	13,7	86,3

Quelle: Daten: BfG 2020

Ein Gesamtvolumen von 232,4 Mio. m³ (HWR) und eine Fläche von 48,77 km² (DRV) ist derzeit im Rahmen von 32 Vorhaben im NHWSP für das **Flussgebiet Rhein** enthalten, aufgeteilt in 17 gesteuerte (HWR) und 15 ungesteuerte (DRV) Maßnahmen. Während sich mehr als 85 % des zu schaffenden gesteuerten Rückhaltevolumens direkt am Rhein befindet, soll mit über 65 % der größere Anteil der ungesteuerten Maßnahmen an den Nebenflüssen im Einzugsgebiet realisiert werden. 14 der 32 zu realisierenden Vorhaben sind sogenannte Verbundmaßnahmen.

Zwei gesteuerte Flutpolder (HWR) mit einem Gesamtvolumen von 113 Mio. m³ sind als NHWSP-Maßnahmen an der **Oder** gemeldet.

Aus dem **Flussgebiet Weser** wurden 4 Maßnahmen in das NHWSP aufgenommen. Alle Vorhaben liegen an Quell- bzw. Nebenflüssen der Weser; sie besitzen insgesamt ein Volumen von 2,1 Mio. m³ (HWR, 1 Maßnahme) bzw. eine Fläche von 5,32 km² (DRV, 3 Maßnahmen). Von Letzteren sind zwei Maßnahmen als Verbundmaßnahmen gemeldet.

Tabelle 1 und 2 machen deutlich, dass die größten Volumen- bzw. Flächenanteile der im NHWSP gemeldeten Maßnahmen auf das Elbegebiet entfallen. Das Volumen der dortigen HWR-Maßnahmen macht annähernd 60 % des gesamten im NHWSP gelisteten Rückhaltevolumens aus, die Flächen in der Kategorie DRV nehmen sogar mehr als 76 % der deutschlandweit gemeldeten Gesamtfläche ein. Von diesem Flächenanteil entfallen über 90 % auf die DRV-Maßnahmen an der Schwarzen Elster und Unstrut/Gera (s. o.), die sich derzeit in einem frühen Planungsstadium befinden (Hatz & Reeps 2021). Ungefähr 40 % des im Elbegebiet gemeldeten gesteuerten Retentionsraums beziehen sich auf die Verbundmaßnahme an der Havel (lfd. Nr. 12 in Tab. A-6) und beschreiben bei vergangenen Hochwassern (2002, 2013) bereits genutzte Speicherräume, deren Funktionalität im Rahmen des NHWSP zu optimieren ist. Auch für das Donau- und Rheingebiet sind (allerdings in deutlich geringerem Umfang) bei Hochwassern bereits beaufschlagte Flächen gemeldet, die im NHWSP Gegenstand von Optimierungen sind (lfd. Nr. 2 und 3 im natürlichen Überschwemmungsgebiet „Riedstrom“, Tab. A-1), deren gemeldete

Maßnahmengröße im Kontext mit bereits außerhalb des NHWSP realisierten Maßnahmen gesehen werden muss (z.B. lfd. Nr. d, Tab. A-3; vgl. hierzu Hatz et al. 2021) oder deren tatsächlich realisierbarer Umfang sich erst im Rahmen fortschreitender Planungen (lfd. Nr. 15, Tab. A-3) konkretisieren wird. Die insgesamt im NHWSP gemeldete Flächen- bzw. Volumengröße beschreibt somit zu teilweise beträchtlichen Anteilen nicht nur neu geschaffene bzw. wiedergewonnene Retentionsräume, sondern auch Flächen, die bereits heute als Überschwemmungsflächen am Abflussgeschehen teilhaben.

Im Hinblick auf die für Donau, Elbe und Rhein durchgeführten großräumigen Wirkungsanalysen, die in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden, illustrieren die in Tabelle 1 und 2 berechneten Anteile der Maßnahmen an den Nebengewässern (13 – 62 % in der Kategorie HWR, 41 – 94 % bei den DRV-Maßnahmen) die Herausforderung im FuE-NHWSP, mittels geeigneter gekoppelter Modellsysteme nicht nur die Maßnahmen an den namensgebenden Hauptströmen Donau, Elbe und Rhein, sondern auch die Maßnahmen in den Nebenflüssen zu erfassen. Hierfür geeignete Modellsysteme auszuwählen und zu betreiben, stellte eine wesentliche Aufgabe im FuE-NHWSP dar (Kap. 3.3).

Die Erfahrungen bei der Umsetzung von Großprojekten im Hochwasserschutz zeigen, dass sowohl die Planung als auch die Realisierung zeit- und raumbezogenen Veränderungen unterliegen. So kann sich bspw. die Größe der verfügbaren Flächen / Volumina ändern oder sich die bauliche Umsetzung einer Maßnahme konkretisieren. Mit fortschreitendem Planungs- und Genehmigungsprozess sind in der Vergangenheit bereits Projekte verworfen oder nicht weiterverfolgt worden. Durch seine jährliche Fortschreibung macht sich das NHWSP diese dynamische Komponente jedoch auch zunutze, indem Anreize geschaffen werden, Untersuchungen zu möglichen neuen Maßnahmenstandorten durchzuführen und diese zukünftig in das Programm aufzunehmen.

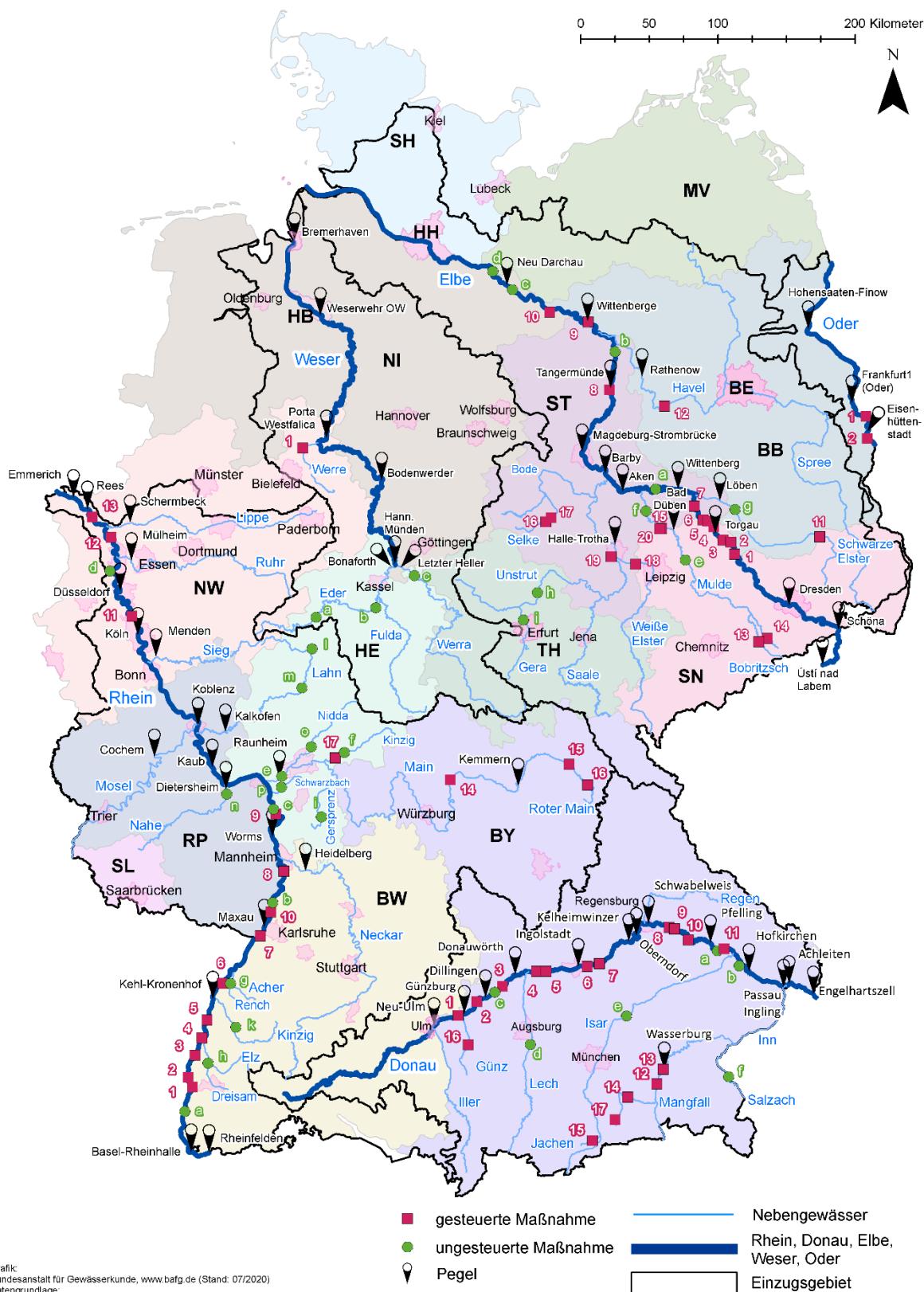
Tabelle 3: Übersicht über die prozentuale Verteilung der geplanten Maßnahmenumsetzung² in den Zeiträumen bis 2021, 2022-2027 und 2027+

Flussgebiet	Anteil der bis 2021 umgesetzten Maßnahmen (HWR + DRV) [%]	Anteil der zwischen 2022 und 2027 umgesetzten Maßnahmen (HWR + DRV) [%]	Anteil der nach 2027 umgesetzten Maßnahmen (HWR + DRV) [%]
Donau	0	35	65
Elbe	3	41	55
Oder	0	0	100
Rhein	3	53	44
Weser	0	25	75
NHWSP (gesamt)	4	40	56

Quelle: Daten: BfG 2020

²Die Anteile an den Umsetzungszeiträumen wurden berechnet über die Anzahl an Maßnahmen in der jeweiligen Zeitscheibe.

Abbildung 1: Im NHWSP in den Flussgebieten gemeldete Maßnahmen



Verwaltungsgebiete mit Einwohnerzahlen 1.250.000 - Stand 31.12.2013 © GeoBasis-DE / BKG 2015

Daten: BfG 2020; Nummerierung der gesteu

Maßnahmen entsprechend Tab. A-1 bis A-9

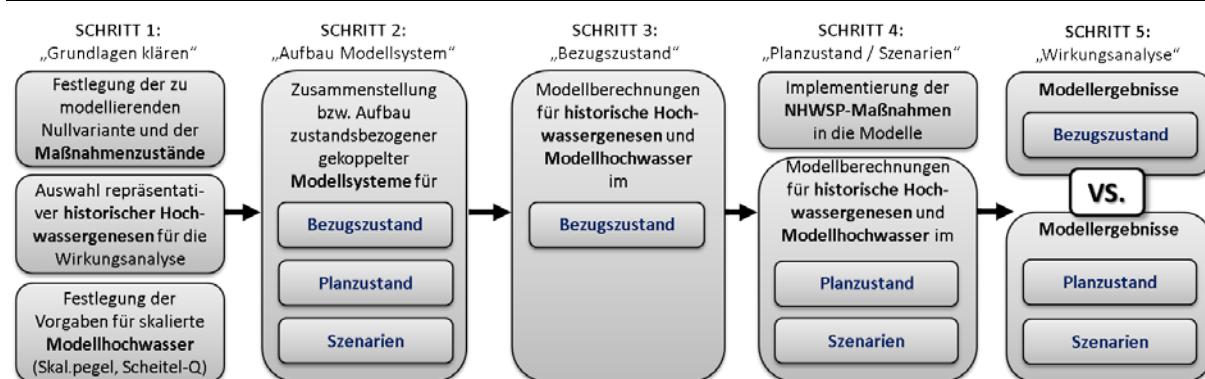
Vergleicht man die in Tabelle 3 im Jahr 2020 prognostizierten Umsetzungszeiträume der Maßnahmen mit den „groben Schätzungen“ (Buschhäuser et al. 2018) zur Umsetzbarkeit, bspw. bei der Ermittlung des geplanten Finanzbedarfs in LAWA (2014) (siehe auch BfG 2014a), so zeigen sich aus nachvollziehbaren Gründen (vgl. BRH 2019) auch im NHWSP Verschiebungen zwischen den Zeitscheiben. Im Jahr 2020 sind bundesweit Teilmaßnahmen von vier Verbundmaßnahmen im eNHWSP als „baulich abgeschlossen“ klassifiziert, für sechs weitere Einzel- bzw. Verbundmaßnahmen läuft bereits der Bau (BfG 2020). War im Jahr 2014 für 13 DRV- und HWR-Maßnahmen eine voraussichtliche vollständige Umsetzung in der Zeitscheibe bis 2021 angegeben, so ist dies im Jahr 2020 nur noch für eine der Maßnahmen der Fall. Alle weiteren Maßnahmen befinden sich im Status der Konzeption, Vorplanung, Genehmigung oder in der Phase der Vergabe der Bauleistungen. Zahlreiche Maßnahmen werden somit in der Zeitscheibe ab 2022 (Zeithorizonte *bis 2027 und 2027+*) in die Phase der baulichen Umsetzung eintreten. Im Gesamtprozess des NHWSP ist davon auszugehen, dass sich mit verstärkter baulicher Umsetzung der Maßnahmen auch ein erhöhter Bedarf an Fördermitteln aus dem SRP der GAK ergibt. Kann dieser durch die zur Verfügung stehenden Mittel nicht vollständig gedeckt werden, so kann der Priorisierung der Maßnahmen im NHWSP (vgl. Kap. 2.1 und 5.2 bzw. 5.3) eine deutlich höhere Bedeutung zukommen, als dies derzeit (bei nicht voll ausgeschöpftem jährlichem Fördermittelbudget) der Fall ist.

3 Vorgehensweise und Modellierung

Der im FuE-NHWSP bundesweit verfolgte Untersuchungsansatz will vergleichbare Standards für die Wirkungsanalysen im Vorhaben etablieren, um auf entsprechender Basis für Donau, Elbe und Rhein flussgebietsspezifische und flussgebietsübergreifende Schlussfolgerungen für den überregionalen Hochwasserschutz treffen zu können. Für und innerhalb mehrerer großer deutscher Flussgebiete gleichwertige Ansätze für die Modellierung abzustimmen, stellte eine neue Herausforderung für alle beteiligten Akteure dar – insbesondere, weil in jedem Flussgebiet bereits unterschiedliche Erfahrungen und Rahmenbedingungen zu großräumigen modellbasierten Wirkungsanalysen im Hochwasserschutz vorliegen und Ausgangspunkt für die Abstimmungsprozesse waren (Kap. 5.1).

Der gewählte FuE-Ansatz formuliert Anforderungen an die Nachweisführung, an die hierzu zu verwendenden hydrologischen Grundlagen sowie an die Modellierungswerkzeuge und folgt dabei etablierten Herangehensweisen (BfG 2006, IKSR 2012, SK2020). Abbildung 2 illustriert mit Hilfe einer schematischen Darstellung die einzelnen Arbeitsschritte, die im Projekt für jedes der drei untersuchten Flussgebiete durchgeführt wurden. Sie wird im Folgenden mit ihren wesentlichen Zusammenhängen erläutert; eine ausführlichere, alle drei Flussgebiete berücksichtigende Beschreibung der relevanten Grundlagen findet sich in den Kapiteln 3.1 bis 3.4 dieses Berichts sowie im Detail in den Kapiteln 3 und 4 der jeweiligen Flussgebietsberichte (Hatz & Reeps 2021, Hatz et al. 2021, Schuh et al. 2021).

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur großräumigen Wirkungsanalyse der raumgebenden Maßnahmen des NHWSP im Rahmen des FuE-NHWSP



Quelle: eigene Darstellung, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Die mittels Modellberechnungen zu untersuchenden Maßnahmenzustände orientieren sich an der Vorgabe, im FuE-NHWSP Aussagen zu Wirkungen sowohl der Gesamtheit aller Maßnahmen (Planzustand 2027+) als auch getrennt nach Maßnahmentyp oder räumlicher Lage der Maßnahmen (vier Szenarien) treffen zu können (Kap. 3.1). In allen drei Flussgebieten wurden hierzu maßgebliche Kollektive zu analysierender historischer und skaliertem (Modell-) Hochwasser entwickelt (Kap. 3.2). Sie bestehen überwiegend aus „mittleren“ und „seltenen“ Ereignissen ($\geq HQ_{100}$), die es ermöglichen, Erkenntnisse zur Maßnahmenwirkung bei überregional auftretenden Lastfällen (Kap. 3.2.2) zu gewinnen, die einen großräumigen Maßnahmeneinsatz erfordern (Schritt 1, vgl. Abb. 2). Für die Wirkungsanalysen wurden gekoppelte Modellsysteme zusammengestellt bzw. aufgebaut – für den Bereich der Bundeswasserstraßen waren dies in der Regel die von der BfG betriebenen hydrodynamisch-numerischen (HN) Modelle, ergänzt um weitere Modellstrecken der Bundesländer (Schritt 2). Die eingesetzten Modelle zielen darauf ab, gleichwertig Aussagen zu den Wirkungen von

Maßnahmen sowohl an den Hauptgewässern Donau, Elbe und Rhein als auch an den jeweiligen Nebengewässern im Einzugsgebiet treffen zu können. Die Modellberechnungen für den Bezugszustand stellen die „Nullvariante“ für die Modellierungen dar und berücksichtigen die im NHWSP gemeldeten Maßnahmen nicht (Schritt 3). Dies erfolgt in den Simulationen für den Planzustand 2027+ bzw. für die vier Szenarien, wozu die Maßnahmen der Bundesländer im NHWSP in den Modellen implementiert und nach abgestimmten Vorgaben für die Maßnahmensteuerung eingesetzt werden mussten (Schritt 4). Im FuE-NHWSP bedurfte vor allem die Einigung auf die Grundsätze der in der Modellierung zu verwendenden Maßnahmensteuerungen (Kap. 3.4) eines hohen Abstimmungsaufwands, da die drei Flussgebiete erfahrungsbedingt (s. o.) hierfür unterschiedliche Herangehensweisen verfolgen (Kap. 5.1). Die Gesamtwirkung der im FuE-NHWSP gemeldeten und modellierten Maßnahmen ergibt sich aus dem Vergleich zwischen den Ergebnissen für den Bezugszustand und für den Planzustand 2027+. Die Ergebnisse für die Szenarien wurden vor allem genutzt, um die Wirkweisen und das komplexe Zusammenspiel zwischen verschiedenen Maßnahmen (typen bzw. -gruppen) besser zu illustrieren (Schritt 5).

3.1 Bezugszustand, Planzustand 2027+ und Szenarien

Zur Ermittlung der überregionalen Gesamtwirkung der NHWSP-Maßnahmen sollen alle gemeldeten Maßnahmen eines Flussgebietes zusammenhängend betrachtet und im Vergleich zum „heutigen“ Zustand ausgewiesen werden. Deshalb müssen sowohl im **Bezugszustand** (ohne NHWSP-Maßnahmen) als auch im **Planzustand 2027+** (mit NHWSP-Maßnahmen) die heute bereits existierenden Hochwasserschutzmaßnahmen im Flussgebiet berücksichtigt werden. Hinsichtlich ihres in die Modelle zu implementierenden Bestands wurde zu Vorhabensbeginn zunächst das Jahr 2014 (Beschlusszeitpunkt des NHWSP) als Bezug ausgewählt. Im Projektverlauf wurden dann die für den Bezugszustand berücksichtigten Maßnahmen um relevante, großräumig wirksame Retentionsmaßnahmen ergänzt, deren Fertigstellung bis Ende 2018 deutlich absehbar war. Dieser Bezugszustand stellt die heutige NHWSP-Nullvariante dar und bildet somit die Vergleichsgrundlage für den im FuE-NHWSP betrachteten zukünftigen Planzustand 2027+ und die Szenarien.

Für die Untersuchungen im Donaugebiet war diese flussgebietsübergreifend getroffene Definition des Bezugszustands jedoch nicht überall zielführend. Grund hierfür sind die umfangreichen wasserbaulichen Veränderungen im 80 km langen Donauabschnitt zwischen Straubing und Vilshofen, die im Zuge des Donauausbaus derzeit und in den kommenden Jahren realisiert werden und die zu großen Teilen auch das Hochwasserschutzniveau betreffen. Für eine aussagekräftige Wirkungsanalyse der NHWSP-Maßnahmen, die im gleichen Planungshorizont wie der Donauausbau realisiert werden sollen, müssen dessen hochwasserrelevante Maßnahmen zwingend berücksichtigt werden. Deshalb wurde für das Donaugebiet der Zustand nach Donauausbau als sogenannter „fiktiver“ Bezugszustand definiert und verwendet (Schuh et al. 2021).

Die Wirkungsanalysen werden sowohl für die Gesamtheit aller gemeldeten Maßnahmen (d. h. für den Planzustand 2027+) als auch getrennt für die beiden gemeldeten Maßnahmentypen (**Szenarien** „nur gesteuerte Maßnahmen“ [HWR] bzw. „nur ungesteuerte Maßnahmen“ [DRV]) und im Hinblick auf ihre unterschiedliche räumliche Lage im Flussgebiet (Szenarien „Maßnahmen nur am Hauptgewässer“ bzw. „Maßnahmen nur an den Nebengewässern“) ausgewertet. Zusätzlich zum Planzustand 2027+ waren somit vier weitere Maßnahmenkombinationen zu untersuchen, die Hinweise zum Zusammenspiel der Maßnahmen, deren überregionalen Wirkweisen und ihrer Bedeutung für die Gesamtwirkung in den Flussgebieten geben konnten (Kap. 5.2).

3.2 Erzeugung von Modellhochwassern (Bezugszustand)

Die modellbasierten Analysen im FuE-NHWSP sollen sich auf eine größere Auswahl außergewöhnlicher (Kap. 1), überwiegend „mittlerer“ und „seltener“ Ereignisse stützen. Damit mit dieser auch die Wirkungen der Maßnahmen an den Nebengewässern analysiert werden kann, muss das Kollektiv gewählter Ereignisse möglichst Hochwasser an allen aufgrund von Maßnahmenmeldungen für das FuE-NHWSP relevanten Nebenflüssen beinhalten. Anhand dieser Kriterien wurden zuerst in jedem Flussgebiet fünf (Donau) oder sechs (Elbe, Rhein) charakteristische **historische Hochwasserereignisse** ausgewählt. Sie sind in den Tabellen B-1 bis B-3 mit ihren maximal am Hauptstrom erreichten Jährlichkeiten aufgeführt. Eine kurze meteorologisch-hydrologische Charakterisierung kann den Flussgebietsberichten und der jeweils letzten Spalte der Tabellen B-1 bis B-3 entnommen werden. Allen drei Flussgebieten ist gemeinsam, dass das Hochwasser vom Juni 2013, dessen katastrophale Folgen im Elbe- und Donaugebiet die Initiierung des NHWSP beförderten, eines der ausgewählten historischen Ereignisse darstellt.

Bei historischen Ereignissen sind die Wellenformen und somit auch die Abflussfüllen im Scheitelsegment von den jeweiligen ereignisspezifischen hydrologischen Randbedingungen abhängig. Außerdem zeigen die Hochwasser eine unterschiedliche Saisonalität (v. a. Winter-, Frühjahr-, Sommerereignisse) und Regionalität (bzgl. Abflussbeiträge der Teileinzugsgebiete, besonders betroffene Abschnitte des Hauptstroms etc.). Es erreichen allerdings nur wenige Hochwasser Scheitelabflüsse $\geq HQ_{100}$, so dass durch die Auswahl nicht in jedem Flussgebiet und für jede hydrologische Genese ausreichend große Hochwasser vorliegen, die für die Wirkungsanalysen im FuE-NHWSP geeignet sind (siehe Kap. 3.2.2).

Es wurden deshalb auf Basis ausgewählter historischer Ereignisse (Tab. B-1 bis B-3) **Modellhochwasser** generiert, die entsprechend hohe Scheitelabflüsse vorweisen können und anhand verschiedener Hochwassergenesen (Ganglinienform, Fülle) zu differenzieren sind. Verfahren hierzu wurden in der Vergangenheit bereits in Untersuchungen von Bundesländern und Bund etabliert (z. B. BfG 2006, IKSR 2012) und im Rahmen des FuE-NHWSP in teilweise modifizierter Form aufgegriffen. Durch die so möglichst großräumig entlang der Hauptströme und in den Nebengewässern erzeugten außergewöhnlichen Lastfälle konnten die gemeldeten Maßnahmen in ihrem Zusammenwirken untersucht und Aussagen zur überregionalen Wirksamkeit getroffen werden.

3.2.1 Vorgehensweise und Definition des Begriffs „Skalierungspegel“

Grundlagen für die Modellhochwasser bilden jeweils die Hochwassergenesen, die aus den Tabellen B-1 bis B-3 ausgewählt wurden. Es sind für jedes Ereignis sämtliche Abflussganglinien an den Rändern des verwendeten Modellsystems durch einen pro Ereignis möglichst einheitlichen Skalierungsfaktor so zu vergrößern bzw. zu verkleinern, dass der Scheitelabfluss des jeweiligen mit diesen Randbedingungen modellierten Hochwassers an einer definierten Gewässerstation (Skalierungspegel) einen geforderten Scheitelwert erreicht (siehe Kap. 3.2.2). Der **Skalierungspegel** stellt im FuE-NHWSP somit den Standort dar, für den der geforderte Scheitelabfluss bei der Skalierung der Modellhochwasser im Bezugszustand erreicht werden soll. Die Faktorisierung der Randbedingungen erfolgt nur oberstrom des jeweiligen Skalierungspegels; unterstrom des Skalierungspegels gehen die tatsächlich gemessenen, unvergrößerten Zuflüsse in das Modell ein. Das zeitliche Zusammentreffen der verschiedenen Ganglinien bleibt bei dieser Methode weitgehend unverändert. Dies gilt ebenso für die räumliche

Differenzierung der Abflussanteile aus den Nebenflüssen ober- und unterstrom des Skalierungspegels (siehe hierzu auch IKSR 2006)³.

Die Modellhochwasser bzw. Skalierungsfaktoren werden für den Bezugszustand, d. h. unter Berücksichtigung aller in diesem Zustand bereits realisierter Rückhaltemaßnahmen ermittelt. Die aus diesen Berechnungen hervorgehenden Faktoren gelten unverändert auch für die Modellierungen des Planzustands 2027+ und der Szenarien.

3.2.2 HQ_{mittel} und HQ_{selten} für Modellhochwasser im FuE-NHWSP

In Anlehnung an die Hochwassereintrittswahrscheinlichkeiten der EU-Hochwasserrisiko-management-Richtlinie sollen durch die skalierten Modellhochwasser „mittlere“ (HQ_{mittel}) und „seltene“ (HQ_{selten}) Scheitelabflüsse an den Skalierungspegen erreicht werden. Der „mittlere“ Abfluss soll dabei an dem aktuell gültigen HQ₁₀₀-Abfluss orientieren, der „seltene“ Abfluss zwischen 10 % und 20 % größer sein als das HQ_{mittel}. Das mögliche Abflussspektrum für die Festlegung von HQ_{selten} wurde so gewählt, dass für die erzeugten Modellhochwasser in der Regel davon ausgegangen werden kann, dass ein ungewolltes Deichüberströmen nicht auftritt.

Mögliche Auswirkungen von Deichüberströmen und Deichbrüchen werden im FuE-NHWSP aufgrund der Fokussierung auf das Zusammenwirken der Maßnahmen – im Gegensatz zu bspw. Untersuchungen der IKSR im Rheingebiet (IKSR 2012) – nicht berücksichtigt. Die Tabellen 4 bis 7 geben einen Überblick über die in den Flussgebieten jeweils ausgewählten Skalierungspegel und die Festlegungen zu den durch die Skalierung zu erreichenden Scheitelabflüssen an den Skalierungspegen. Die Skalierungsfaktoren geben die Bandbreite der tatsächlich für die Skalierung der Randbedingungen verwendeten Faktoren an.

Im deutschen **Donaugebiet** kann der Inn als abflussstärkster Nebenfluss der Donau dazu beitragen, dass dieser unterstrom von Passau bei einem Hochwasser ein neuer und wesentlich höherer Scheitel aufgeprägt wird (siehe auch Tab. B-2). Aufgrund dieser markanten Charakteristik in der Hochwasserentstehung und der vorgesehenen NHWSP-Maßnahmenstandorte im Einzugsgebiet des Inns (Abb. 1) bietet es sich an, bei der Skalierung von Modellhochwassern das Teileinzugsgebiet des Inns gesondert zu berücksichtigen, so dass im Donaugebiet vier anstatt zwei Skalierungspegel ausgewählt wurden (Tab. 4 und 5). Für die Analyse der an der Donau gemeldeten Maßnahmen waren außergewöhnliche Modellhochwasser v. a. oberstrom der Isarmündung zu generieren, da unterstrom keine weiteren gesteuerten NHWSP-Maßnahmen geplant sind. Deshalb wurden, je nach Hochwassergenese, die Pegel Ingolstadt bzw. Schwabelweis als Skalierungspegel genutzt. Im Einzugsgebiet des **Inns** waren Modellhochwasser zu generieren, die eine Analyse der gesteuerten Maßnahmen im oberen Inngebiet (Tegernsee, Mangfall) sowie am Inn zwischen Mangfall- und Salzachmündung ermöglichen. Als Skalierungspegel wurden deshalb die Pegel Wasserburg bzw. Passau-Ingling verwendet.

Die zu erreichenden Größenordnungen der skalierten Modellhochwasser an Donau und Inn orientieren sich maßgeblich an den Einsatzkriterien bestehender und geplanter Hochwasserrückhaltemaßnahmen in beiden Flussgebieten. Die überwiegende Zahl der gemeldeten Maßnahmen an Donau und Inn sind Flutpolder (Abb. 1), die gewöhnlich erst im Überlastfall eingesetzt werden, wenn eine Überschreitung der Bemessungswasserstände der unterstrom liegenden Hochwasserschutzanlagen droht. Hochwasserschutzdeiche entlang von Donau und Inn sind i. d. R. auf Ereignisse bemessen, die sich am HQ₁₀₀ (ggf. mit Klimazuschlag) orientieren und somit in der Größenordnung des vorgeschlagenen HQ_{mittel} liegen. Vor diesem

³ Weitere Kriterien für die Skalierung, bspw. um hinsichtlich Abflussfüllen oder maximalen Scheitelwerten keine hydrologisch unplausiblen Konstellationen zur erzeugen, wurden bei Bedarf flussgebietsspezifisch festgelegt und sind in den Flussgebietsberichten dokumentiert.

Hintergrund wurde auf eine Vergrößerung der Hochwasserscheitel auf HQ_{mittel} verzichtet und stattdessen zwei Scheitelabflüsse HQ_{selten 1} und HQ_{selten 2} für die Generierung der Modellhochwasser gewählt. Sie sind für das FuE-NHWSP als HQ₁₀₀ x 1,1 bzw. HQ₁₀₀ x 1,2 am jeweiligen Skalierungspegel definiert. Die Jährlichkeiten dieser Scheitelabflüsse liegen an den beiden Donaupegeln bei ≥ HQ₂₀₀ bzw. ≥ HQ₅₀₀. Damit ist für die Modellhochwasser gewährleistet, dass der erzeugte Scheitel mindestens am Skalierungspegel deutlich über HQ₁₀₀ liegt, so dass auch mehrere Flutpolder einer Flutpolderkette eingesetzt werden können, ohne dass der erste Flutpolder den Scheitel bereits auf einen Wert unter den Bemessungsabfluss bzw. -wasserstand kappt (und die weiteren Flutpolder nicht mehr zum Einsatz kommen).

Tabelle 4: Übersicht über die wichtigsten Parameter der Modellhochwassergenerierung im Flusssgebiet Donau (Modellhochwasser an der Donau)

Hochwasser-genese	Zielpegel	Zielgröße	Scheitel-abfluss [m ³ /s]	Statistische Einordnung	Skalierungs-faktor
1999, 2005	Ingolstadt	HQ _{selten 1}	2310	HQ ₁₀₀ x 1,1	1,155 - 1,265
1999, 2005	Ingolstadt	HQ _{selten 2}	2520	HQ ₁₀₀ x 1,2	1,286 - 1,382
2013	Schwabelweis	HQ _{selten 1}	3740	HQ ₁₀₀ x 1,1	1,594
2013	Schwabelweis	HQ _{selten 2}	4080	HQ ₁₀₀ x 1,2	1,737

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle 5: Übersicht über die wichtigsten Parameter der Modellhochwassergenerierung im Flusssgebiet Donau (Modellhochwasser am Inn)

Hochwasser-genese	Zielpegel	Zielgröße	Scheitel-abfluss [m ³ /s]	Statistische Einordnung	Skalierungs-faktor
2002, 2013	Passau-Ingling	HQ _{selten 1}	7480	HQ ₁₀₀ x 1,1	1,179 - 1,513
2002, 2013	Passau-Ingling	HQ _{selten 2}	8160	HQ ₁₀₀ x 1,2	1,286 - 1,651
2005	Wasserburg	HQ _{selten 1}	3135	HQ ₁₀₀ x 1,1	1,144
2005	Wasserburg	HQ _{selten 2}	3420	HQ ₁₀₀ x 1,2	1,248

Quelle: Daten: BfG 2020

Obwohl sich auch im **Elbegebiet** die Bemessung der Hochwasserschutzanlagen an den Abflüssen für HQ₁₀₀ orientiert (FGG Elbe 2018), war es aufgrund der Genese der zu skalierenden Hochwasser 2002, 2006 und 2013 (Tab. B-3) nicht notwendig, auf Modellhochwasser der Größenordnung HQ_{mittel} zu verzichten. Der am Pegel Lutherstadt Wittenberg an der oberen Mittelelbe zu erreichende Scheitelabfluss für HQ_{mittel} beträgt 4200 m³/s und entspricht annähernd dem in Sachsen-Anhalt verwendeten HQ₁₀₀-Wert von 4180 m³/s (LHW 2019). Modellhochwasser in der Größenordnung von HQ_{selten} werden am Pegel Wittenberg auf einen Scheitelabfluss von 4600 m³/s vergrößert – dieser liegt somit etwa 10 % höher als der Abfluss für HQ_{mittel} und entsprechend LHW (2019) bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von etwas weniger als 200 Jahren. Für den Skalierungspegel Tangermünde (50 km oberstrom der Havelmündung, die den Übergang zur unteren Mittelelbe kennzeichnet) wurde der Scheitelabfluss für HQ_{mittel} mit 4770 m³/s festgelegt. Dieser Wert wurde in FGG Elbe (2018) als Orientierungswert für den Bemessungsabfluss BHQ bestätigt und liegt nur wenig tiefer als der von der FGG Elbe festgelegte HQ₁₀₀-Abfluss von 4860 m³/s. Die Modellhochwasser für HQ_{selten} erreichen im Bezugszustand einen Scheitelabfluss von 5250 m³/s, liegen somit in ihrem

Maximum 10 % höher als die Ereignisse für HQ_{mittel} und besitzen eine Jährlichkeit von etwas mehr als 200 Jahren (FGG Elbe 2018).

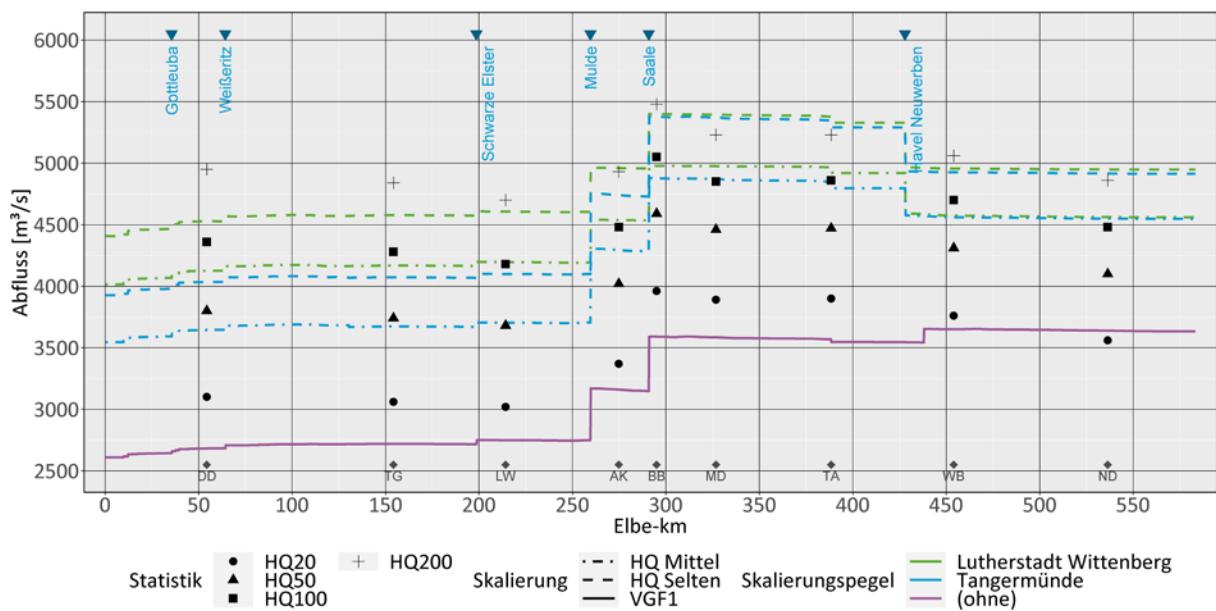
Tabelle 6: Übersicht über die wichtigsten Parameter der Modellhochwassergenerierung im Flusssgebiet Elbe

Hochwasser-genese	Zielpegel	Zielgröße	Scheitel-abfluss [m ³ /s]	Statistische Einordnung	Skalierungs-faktor
2002, 2006, 2013	Wittenberg	HQ _{mittel}	4200	~ HQ ₁₀₀	0,905 - 1,539
2002, 2006, 2013	Wittenberg	HQ _{selten}	4600	~ HQ _{mittel} x 1,1	0,997 - 1,689
2002, 2006, 2013	Tangermünde	HQ _{mittel}	4770	BHQ	0,907 - 1,359
2002, 2006, 2013	Tangermünde	HQ _{selten}	5250	~ HQ _{mittel} x 1,1	0,999 - 1,505

Quelle: Daten: BfG 2020

Die auf Grundlage der beschriebenen Festlegungen zur Skalierung erzeugten Abflusslängsschnitte der Modellhochwasser an der Elbe (Scheitel) stellt Abbildung 3 exemplarisch für das Hochwasser 2006 im Elbegebiet dar. Im Vergleich zum deutlich niedrigeren historischen Hochwasser mit Maximalabflüssen ≤ HQ₂₀ (durchgezogene lilafarbene Linie), erreichen die vier vergrößerten Modellhochwasser (unterbrochene Linien) unterstrom der Saalemündung durchweg Scheitel im Bereich um HQ₁₀₀ bzw. deutlich darüber. Die beiden höchsten auf diese Weise erzeugten Ereignisse liegen auch an der Oberen Elbe in den Größenordnungen der Kriterien für einen lokalen Einsatz der dortigen Maßnahmen. An den wichtigen Nebenflüssen Mulde und Saale werden bei den vier skalierten Modellhochwassern Scheitelabflüsse zwischen HQ₂ und HQ₂₀ modelliert (nicht dargestellt), weshalb dort ein gesteuerter Maßnahmeneinsatz nur bei einzelnen 2006er-Modellhochwassern (Saale) bzw. gar nicht erfolgt (Mulde). Die dortigen Maßnahmen werden stattdessen bei den skalierten Modellhochwassern der Jahre 2002 und 2013 eingesetzt (siehe Hatz & Reeps 2021).

Abbildung 3: Abflusslängsschnitte für das historische Hochwasser 2006 an der Elbe und vier darauf basierende Ereignisse in der Größenordnung HQ_{mittel} und HQ_{selten}



Kurzbezeichnungen der Pegelstandorte: siehe Abkürzungsverzeichnis

Quelle: eigene Darstellung, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Für den Pegel Worms am **Oberrhein** sollte als HQ_{mittel} des FuE-Vorhabens jeweils ein Scheitelabfluss von 5850 m³/s erreicht werden. Da im gewählten Bezugszustand bereits zahlreiche realisierte Hochwasserrückhaltemaßnahmen am Oberrhein eingesetzt werden, muss eine statistische Einordnung des gewählten Scheitelabflusses deren Wirkung berücksichtigen. Zurückgegriffen wurde deshalb auf IKSР (2015), wo für den dort berechneten Ausbauzustand 2010, der mit dem Bezugszustand 2018 im FuE-NHWSP annäherungsweise vergleichbar ist, das gewählte HQ_{mittel} ungefähr als HQ₁₀₀ eingeordnet wird. Modellhochwasser in der Größenordnung von HQ_{selten} werden im FuE-NHWSP-Bezugszustand (mit Wirkung der in diesem Zustand bereits vorhandenen Maßnahmen) am Pegel Worms jeweils auf einen Scheitelabfluss von 6300 m³/s vergrößert – dieser liegt somit etwa 10 % höher als der Abfluss für HQ_{mittel}.

Tabelle 7: Übersicht über die wichtigsten Parameter der Modellhochwassergenerierung im Flusssgebiet Rhein

Hochwasser-genese	Zielpegel	Zielgröße	Scheitel-abfluss [m ³ /s]	Statistische Einordnung	Skalierungs-faktor
1988, 1995, 2003	Worms	HQ _{mittel}	5850	~ HQ ₁₀₀ ⁴	1,229 - 2,078
1988, 1995, 2003	Worms	HQ _{selten}	6300	~ HQ _{mittel} x 1,08	1,295 - 2,210
1988, 1995, 2003	Köln	HQ _{selten 1}	13200	HQ ₁₀₀ x 1,1	1,294 - 1,859
1988, 1995, 2003	Köln	HQ _{selten 2}	14400	HQ ₁₀₀ x 1,2	1,294 - 2,084

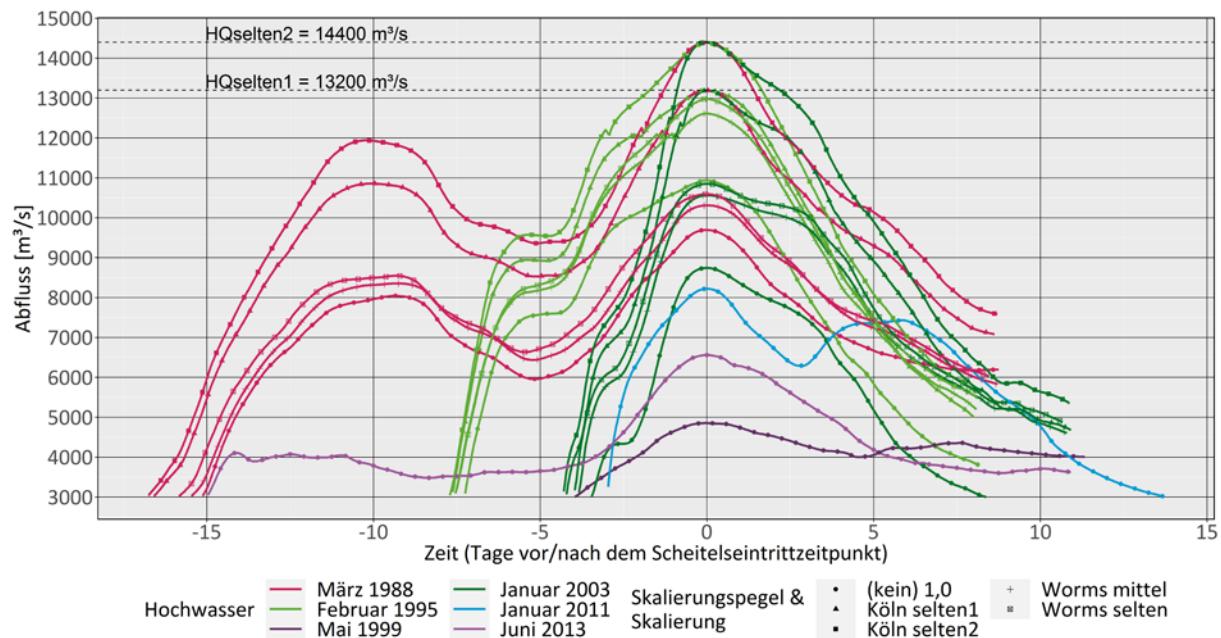
Quelle: Daten: BfG 2020

Am Pegel Köln (**Niederrhein**) beträgt der derzeit gültige Wert für einen HQ₁₀₀-Abfluss 12000 m³/s. Allerdings orientieren sich an der Niederrheinstrecke die Bemessungsabflüsse und damit die Einsatzkriterien der NHWSP-Maßnahmen an HQ₂₀₀ im Regierungsbezirk Köln und an HQ₅₀₀ im Regierungsbezirk Düsseldorf. Modellhochwasser in der Größenordnung von HQ₁₀₀ hätten (vergleichbar zur Donau) zur Folge, dass die im FuE-NHWSP zu untersuchenden Maßnahmen am Niederrhein (RHR Worringer Bruch, Orsoy-Land und Lohrwardt) in solchen Modellläufen nie eingesetzt würden. Auf eine Skalierung auf HQ_{mittel} wird deshalb verzichtet, stattdessen erfolgt eine Vergrößerung auf die beiden HQ_{selten}-Werte 13200 m³/s (HQ₁₀₀ x 1,1) und 14400 m³/s (HQ₁₀₀ x 1,2). Damit werden am Pegel Köln im Bezugszustand Scheitelabflüsse erzielt, die dort über den Werten für HQ₂₀₀ (12900 m³/s) bzw. HQ₅₀₀ (14200 m³/s) liegen.

Abbildung 4 zeigt alle 18 Ganglinien der historischen (6) und skalierten (12) Hochwasser am Pegel Köln, die unterschiedliche Wellenformen/Abflussfüllen vorweisen und Scheitelabflüsse zwischen < HQ₂ und > HQ₅₀₀ erreichen. Zu erkennen sind jeweils die drei Modellhochwasser, die am Skalierungspegel Köln einen Scheitel von HQ_{selten 1} oder HQ_{selten 2} erreichen sowie die niedriger liegenden Scheitel der historischen sowie der auf den Skalierungspegel Worms faktorierten Ereignisse.

⁴ Die statistische Einordnung des HQ_{mittel} am Pegel Worms erfolgt anhand IKSР (2015) für den dort berechneten Ausbauzustand 2010, der mit dem Bezugszustand 2018 im FuE-NHWSP annähernd vergleichbar ist.

Abbildung 4: Abflussganglinien der 18 im FuE-NHWSP untersuchten Hochwasser am Pegel Köln im Bezugszustand



Quelle: eigene Darstellung, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Insgesamt ergeben sich in den drei Flussgebieten somit aus der Kombination von Hochwassergesenen, Skalierungspegeln und zu erreichenden Scheitelabflüssen jeweils 12 skalierte Modellhochwasser, die zusätzlich zu den fünf bzw. sechs historischen Ereignissen im FuE-NHWSP modellbasiert untersucht werden. Die für die Skalierung der Hochwasser gemachten Vorgaben (vgl. 1. Absatz von Kap. 3.2.2) stellten dabei den Rahmen dar, der flussgebietsspezifisch ausgenutzt wird. Gestartet mit dem Ziel einer Vergleichbarkeit zwischen den Hochwassern, stand im Zuge der Festlegung der Modellhochwasser schlussendlich immer stärker die Frage im Vordergrund, inwieweit durch die erzeugten Modellhochwasser das Zusammenwirken und die großräumigen Auswirkungen mehrerer Maßnahmen am Fluss bzw. im Flussgebiet illustriert und untersucht werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen und möglichst für jede Maßnahme im NHWSP einen Einsatzfall zu erzeugen, wurde teilweise auf die Skalierung auf HQ_{mittel} verzichtet (Donau, Niederrhein) oder die Anzahl an Skalierungspegeln (Donau) erhöht bzw. Sonderszenarien berechnet (Donau, Elbe, Rhein; im vorliegenden Synthesebericht nicht dargestellt, siehe Flussgebietsberichte).

3.3 Verwendete Modellsysteme

Die überregionale Wirkung von gesteuerten und ungesteuerten Rückhaltungen auf Abflüsse und Wasserstände kann nach heutigem Stand der Technik mit hoher Auflösung und für große Strecken insbesondere durch den Einsatz von hydrodynamisch-numerischen Modellen (HN-Modellen) nachgewiesen werden. In den drei untersuchten Flussgebieten liegen für das FuE-NHWSP jedoch Modellsysteme vor, die an Hauptstrom und Nebenflüssen zum Teil auf unterschiedlichen Modelltypen (nicht nur HN-Modellen) bzw. Datengrundlagen basieren. Die im Projektkontext verfügbaren HN-Modelle unterscheiden sich v. a. in ihrer räumlichen Ausdehnung und Auflösung, hinsichtlich der zu Grunde liegenden morphologischen Daten (Qualität, Zeitstempel), in der Modelltechnik und den ursprünglichen Anwendungsfällen bzw.

Zielstellungen (BfG 2017)⁵. Abbildung 5 stellt die in den Flussgebieten im FuE-NHWSP genutzten Modellsysteme im Überblick dar.

Während die Modellberechnungen an den Hauptgewässern weitestgehend hochauflöst mit hydraulischen Modellen erfolgten, kamen an den Nebengewässern ganz verschiedene Modellsysteme und -kombinationen zum Einsatz. Dort, wo im Projektkontext keine großräumigen, sondern nur lokale HN-Modelle zur Verfügung standen, wurden diese bspw. zum lokalen bzw. regionalen Nachweis der Maßnahmenwirkung eingesetzt und deren Ergebnisse zur Parametrisierung der Maßnahmen(wirkung) in hydrologischen Modellen (Niederschlags-Abfluss- bzw. Wasserhaushaltmodellen) eingepflegt (z. B. an der Isar, Abb. 5). Sie wurden somit ebenfalls Bestandteile der jeweiligen flussgebietsweiten Modellsysteme im FuE-NHWSP. Für wenige gesteuerte Maßnahmen, bspw. im Inngebiet und im bayerischen Einzugsgebiet des Mains, wurden Modellierungen allein auf Basis von hydrologischen Modellen ohne vorgesetzte hydraulische Berechnung durchgeführt. Aussagen zu scheitelreduzierenden Wirkungen waren im Bereich dieser Modelle nur pegelbezogen möglich. Die verschiedenen verwendeten Modelle wurden im FuE-NHWSP durch die Übergabe der jeweiligen Berechnungsergebnisse fachlich miteinander gekoppelt.

Die Donau wurde mithilfe des eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen SOBEK-Modells der BfG abgebildet (Hydrotec 2020). Für die weiteren Untersuchungen im **Donaugebiet** an Inn und Salzach kam das hydrodynamische HYDRO_AS-2D-Modell der TU München zum Einsatz (Huber 2018), für die geplanten Deichrückverlegungen an der Isar das HYDRO_AS-2D-Modell des WWA München. Die gesteuerten Maßnahmen an Mangfall (Inn) und Jachen (Isar) sowie die geplanten Hochwasserrückhaltebecken an der oberen Günz wurden mithilfe des hydrologischen LARSIM-Modells untersucht (siehe u. a. Aquantec 2018, LEG 2019).

Die Modellierung der Maßnahmen der Bundesländer im NHWSP **an der Elbe und ihren Nebenflüssen** Mulde, Saale und Havel erfolgte mit Hilfe eines gemeinsamen 1D-SOBEK-Modells der Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) und der BfG (BCE 2009, BfG 2018). Ergänzt wurde dieses großräumige Modell durch zwei im Auftrag des TLUBN (Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz) sowie des LfU BB (Landesamt für Umwelt Brandenburg) erstellte hydrodynamische Modellsysteme für die Unstrut (inkl. Gera; HYDRO_AS-2D; Tractebel Hydroprojekt 2020) bzw. die Schwarze Elster (SOBEK-1D/2D; BCE 2012, HKV 2012), die für einzelne Modellläufe zum Einsatz kamen (Tab. 8).

Im **Rheingebiet** wurden die Modellierungen am Rhein oberstrom von Worms von der LUBW mit dem Synoptischen Modell SYNMOD (LUBW & LfU RP 2018) durchgeführt, das sowohl aus hydrologischen als auch aus hydrodynamischen Modellbausteinen besteht. Für die Modellierungen auf der Rheinstrecke unterstrom von Worms konnte die BfG auf ihr 1D- SOBEK-Modell für den Rhein zurückgreifen (HKV Hydrokontor 2014, RiQuest 2017). Für die Wirkungsanalysen am Main unterstrom von Kemmern kam ebenfalls ein 1D-SOBEK-Modell zum Einsatz (Hydrotec 2014), oberstrom setzte das LfU BY sein Wasserhaushaltsmodell LARSIM ein (LEG 2019). Das LARSIM-Modell der LUBW kam zum Einsatz, um die Wirkungen der Maßnahmen der Bundesländer im NHWSP an den Zuflüssen des Oberrheins zu ermitteln.

⁵ Ausführliche Informationen hierzu finden sich jeweils in Kapitel 4 der Flussgebietsberichte und in den in den folgenden Abschnitten modellspezifisch aufgeführten Literaturquellen.

Abbildung 5: Das im FuE-NHWSP verwendete Bund-Länder-Modellsystem in den Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein



Dargestellt sind die auf den Gewässerstrecken verwendeten Modelle sowie die Lage der im NHWSP gemeldeten Maßnahmen in den Flussgebieten.

Quelle: eigene Darstellung, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Tabelle 8: Übersicht über die Berücksichtigung der Volumen- / Flächenanteile der NHWSP-Maßnahmen in den Bund-Länder-Modellsysteme

Die Tabelle unterscheidet nach Maßnahmen, die im FuE-NHWSP vollumfänglich (d. h. für jedes der untersuchten Hochwasser), teilweise (d. h. nur bei einem Teil der untersuchten Hochwasser oder in Sonderszenarien) oder gar nicht in der Modellierung berücksichtigt werden konnten.

Flussgebiet	Donau	Donau	Elbe	Elbe	Rhein	Rhein
Maßnahmenkategorie	HWR	DRV	HWR	DRV	HWR	DRV
Im NHWSP gemeldete(s) Maßnahmenvolumen bzw. -fläche	225,2 Mio. m ³	2167 ha	825,2 Mio. m ³	25011 ha	232,4 Mio. m ³	4887 ha
In jedem Modelllauf berücksichtigte(s) Maßnahmenvolumen bzw. -fläche	225,2 Mio. m ³	1749 ha	738,1 Mio. m ³	2204 ha	209,4 Mio. m ³	2328 ha
Nur in einem Teil der Modellläufe oder nur in Sonderszenarien berücksichtigte(s) Maßnahmenvolumen bzw. -fläche	100 %	80,7 %	89,5 %⁶	8,9 %	90,2 %	47,6 %
<i>Betroffene Maßnahmen (lt. Tabelle A-4, A-6)</i>	-	-	25 Mio. m ³	7840 ha	-	-
In den Modellläufen nicht berücksichtigte(s) Maßnahmenvolumen bzw. -fläche	-	418 ha	62,1 Mio. m ³	14967 ha	23 Mio. m ³	2559 ha
<i>Betroffene Maßnahmen (lt. Tabellen A-1, A-3, A-4, A-6, A-7)</i>	-	c, d	13, 14, 16, 17, 20	c, g	15, 17	c, f, i, l, m, o, p

Quelle: Daten: BfG 2020

Die für das FuE-NHWSP zur Verfügung stehenden Modellsysteme ermöglichten es, die Wirkungen eines großen Teils der Maßnahmen der Kategorie HWR modellbasiert zu analysieren – zwischen 90 % und 100 % des Maßnahmenvolumens wurden in den Flussgebieten in allen Modellläufen berücksichtigt (Tab. 8; siehe dort im Speziellen die Fußnote für das Elbegebiet). Ein deutlich heterogeneres Bild zwischen den Flussgebieten ergibt sich für die gemeldeten DRV-Maßnahmen, deren Flächen im Elbegebiet nur zu 9%, im Rheingebiet zu 48 % und im Donaugebiet zu 81% vollumfänglich in Modellen implementiert sind. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die angegebenen Flächenanteile in allen drei Flussgebieten die Maßnahmen an den Hauptströmen abdecken, während die nicht in Modellen berücksichtigbaren Flächenanteile an den Nebengewässern zu finden sind. Im Elbegebiet können darüber hinaus

⁶ Im Elbegebiet sind aus der Verbundmaßnahme zur Optimierung der Nutzung der Havelpolder und des Stauregimes Havel/Spree – ldf. Nr. 12 in Tab. A-6 – bis zu 320 Mio. m³ Rückhalterraum bereits im Bezugszustand der Modellierung berücksichtigt, da durch die im NHWSP gemeldete Maßnahme vsl. kein neues Volumen geschaffen wird, sondern seine Nutzung lediglich „optimiert“ werden soll (bspw. über neue Ansätze zur Wasserstandssteuerung, bauliche Veränderungen der Deichbreschen, bessere Überwachung der Wasserstände in den Poldern; vgl. Promny 2019)

Maßnahmen unterschieden werden, deren Wirkungen zumindest in einem Teil der regulären Wellenablaufberechnungen oder in Sonderszenarien berücksichtigt werden (Tab. 8).

Die Heterogenität der Modellsysteme spiegelte sich auch im Vorgehen zur Auswertung der Ergebnisse wieder, die an den Hauptströmen streckenbezogen (siehe Abb. 6 bis 8), an den Nebengewässer jedoch überwiegend pegelbezogen und nur exemplarisch streckenbezogen durchgeführt wurden (siehe Flussgebietsberichte).

3.4 Implementierung und Steuerung der NHWSP-Maßnahmen (Planzustand 2027+, Szenarien)

Die Modelle für den Planzustand 2027+ und die Szenarien ergeben sich in den Flussgebieten jeweils aus dem gekoppelten Modellsystem für den Bezugszustand (Kap. 3.3), ergänzt um die im NHWSP gemeldeten Maßnahmen der Kategorien HWR bzw. DRV (soweit abbildungbar, vgl. Tab. 8). Alle in den Modellen zu berücksichtigenden Maßnahmen werden in adäquater Form entsprechend der Modelltechnik und dem bei den Bundesländern / Maßnahmenträgern vorliegenden Planungsstand in die Modellsysteme implementiert. In Abhängigkeit von den zuvor genannten Rahmenbedingungen (Modelltechnik, Planungsstand) konnte die Modellierung somit sehr detailgetreu (2D-Modelle und/oder fortgeschritten Planungsstand), deutlich abstrahierter (1D-Modelle oder früher Planungsstand) oder in Form von modifizierten Randbedingungen / Modellparametern (abgeschätzte oder rechnerisch ermittelte Effekte auf Input-Ganglinien oder Volumen-Abfluss-Beziehungen) stattfinden.

Für alle gesteuerten Maßnahmen waren die prinzipiellen Einsatzkriterien bekannt oder wurden im Zuge von Bund-Länder-Abstimmungen festgelegt. In Abhängigkeit vom jeweiligen Planungsstand konnten diese nur sehr vage („bei einem HQ₁₀₀-Ereignis“) oder bereits überaus detailliert (mit abfluss- bzw. wasserstandsbezogenen Schwellenwerten und Steuerpegeln) formuliert werden. Gleches gilt für die Einbindung in (über-)regionale Einsatzkonzepte und Bewirtschaftungsstrategien, die auch die Wechselwirkungen mit weiteren, bereits vorhandenen oder geplanten Maßnahmen berücksichtigen (LfU BY 2019, SK 2020)⁷.

Die übergeordneten Einsatzkriterien waren zumeist noch relativ gut erfassbar, während die tatsächliche Maßnahmensteuerung bei ihrem Erreichen überwiegend individuell festgelegt werden musste. Es war im FuE-NHWSP nicht die Zielsetzung, passgenaue Steuerungsvorschriften zu erarbeiten (vgl. Kap. 5.4), die allgemein und für eine Vielzahl verschiedener Hochwasser geeignet sind. Zur Umsetzung der Maßnahmeneinsätze bei den im FuE-NHWSP untersuchten (Modell-)Hochwassern wurde deshalb in zwei Schritten und zu einem gewissen Grad idealisiert verfahren:

1. Für jedes Hochwasser und jede Maßnahme wurde geprüft, ob die festgelegten Einsatzkriterien erfüllt sind. Dabei flossen sowohl die Kenntnis über den kompletten Verlauf des Hochwassers als auch über die Wirkung der oberstrom eingesetzten Maßnahmen in die Bewertung mit ein, was in Realität – bspw. aufgrund von Unsicherheiten der Vorhersage und über das Gelingen eines Maßnahmeneinsatzes – nur eingeschränkt möglich ist (Betrachtung „ex post“).
2. Waren unter den in 1. formulierten Randbedingungen die Vorgaben für einen Maßnahmeneinsatz erfüllt, dann wurde die konkrete Steuerung der betrachteten Maßnahme(n) ereignisbezogen vorgenommen, d. h. für jedes simulierte Hochwasser, das einen Maßnahmeneinsatz erfordert, wurde die Bauwerkssteuerung (Öffnungs- und

⁷ Ausführliche Informationen zur Abbildung der einzelnen NHWSP-Maßnahmen finden sich jeweils in Kapitel 4 der Flussgebietsberichte. Dort werden ebenfalls detailliert die Grundsätze erläutert, nach denen in den Modellen des FuE-NHWSP die Steuerung der Maßnahmen (HWR) erfolgt.

Schließungszeitpunkte) individuell und in Kenntnis des Gesamtverlaufs des jeweiligen Hochwassers festgelegt („perfekte Vorhersage“). Grundlegende Bauwerksparameter (Öffnungsweite, Schwellenhöhe, Anzahl und Geschwindigkeit der Öffnungsbauwerke) wurden allerdings nicht ereignisspezifisch angepasst.

Das in 2. beschriebene, ereignisbezogene Steuerungsreglement besitzt zwar eine hohe Flexibilität und kann im Idealfall eine hohe Wirksamkeit aufweisen, bedarf in Realität jedoch einer Steuerung aufgrund aktuell zutreffender Wetter- und Hochwasservorhersagen unter Berücksichtigung oberstrom einsetzender Maßnahmenwirkungen. Ein Nachsteuern bei sich ändernder Wetter- und Hochwasservorhersage (adaptive Steuerung) wäre unerlässlich und wird umso komplexer, je mehr Maßnahmen auf engem Raum (kurzer Gewässerstrecke) sich gegenseitig beeinflussen. Für den Oberrhein (mit zahlreichen interagierenden Maßnahmen) ist ein solches Steuerungsreglement nicht zielführend (vgl. SK 2020). Es ist in allen Flussgebieten anzunehmen, dass aus der im FuE-NHWSP ereignisbezogen „ex post“ umgesetzten Maßnahmensteuerung größere scheitelreduzierende Wirkungen resultieren, als dies bei einer ereignisbezogenen adaptiven Steuerung auf Basis von Vorhersagen oder bei Einsatz eines im Vorfeld eindeutig definierten Steuerungsreglements der Fall wäre.

Denkbare ökologische Flutungen finden in den Modellberechnungen derzeit keine Berücksichtigung. Entleerungsprozesse werden vereinfacht abgebildet und im FuE-NHWSP soweit plausibilisiert, dass sie die Hochwasserwelle unterstrom bzw. im Vorfluter nicht nachteilig beeinflussen (erhöhen).

4 Ergebnisse der Modellierung

In den folgenden Kapiteln 4.1 bis 4.3 werden die Ergebnisse für Donau, Elbe und Rhein mit Fokus auf die Gesamtwirkung aller Maßnahmen im Planzustand 2027+ und an den namensgebenden Hauptströmen (siehe Abb. 6 bis 8) zusammengefasst⁸. Ergebnisse für die Szenarien, die jeweils nur einen Teil der Maßnahmen berücksichtigen (Kap. 3.1) werden soweit erwähnt, wie sie für die in Kapitel 5 und 6 getroffenen flussgebietsübergreifenden Erkenntnisse und Schlussfolgerungen von Relevanz sind. Die vorgestellten Effekte der im NHWSP gemeldeten Maßnahmen auf Hochwasserscheitel und Wellenablauf ergeben sich für die gemäß dem Vorgehen in Kapitel 3.2 ausgewählten bzw. erzeugten (Modell-)Hochwasser und vor dem Hintergrund der in Kapitel 3.4 beschriebenen ereignisbezogenen Maßnahmensteuerung. Für diese ist anzunehmen, dass in allen drei Flussgebieten die scheitelreduzierenden Wirkungen (unter der Annahme realistisch gewählter Einsatzschwellen, aber einer idealisierten Steuerung in A-priori-Kenntnis des gesamten Ereignisverlaufs) günstiger ausfallen als unter realen Bedingungen (u. a. auf Basis von Wetter- und Hochwasservorhersagen).

In Abhängigkeit von der Hochwassergenese, der Höhe des Scheitels sowie den Einsatzkriterien und der daraus resultierenden Anzahl der jeweils eingesetzten Maßnahmen können die berechneten Scheitelreduktionen um mehrere 100 m³/s [Abfluss] bzw. mehrere Dezimeter [Wasserstand] variieren. Die jeweiligen Bandbreiten sind in den Flussgebietsberichten angegeben und können für die Wasserstände und den Planzustand 2027+ den Abbildungen 6 bis 8 visuell entnommen werden. Mit Hilfe von Symbolen werden dort jeweils die Maßnahmen der Kategorien HWR (schwarze Kreise) bzw. DRV (rote Balken) und die wichtigen Pegel (schwarze Rauten) sowie Zuflüsse (blaue Dreiecke) verortet. Die Bezeichnung der Maßnahmen mit Ziffern / Buchstaben erfolgt entsprechend der Tabellen A-1 bis A-9 (Anhang). In den darunter folgenden Längsschnitten finden sich – für die nicht skalierten Ereignisse und die skalierten Modellhochwasser getrennt – mittels streckenbezogener Darstellungen die scheitelreduzierenden Wirkungen im Planzustand 2027+, bei dem potentiell alle Maßnahmen(typen) im Hauptstrom und an den Nebenflüssen eingesetzt werden können. Die weitere Unterteilung der skalierten Modellhochwasser findet in den Längsschnitten an der Donau anhand der Scheitelabflüsse HQ_{selten 1} und HQ_{selten 2} statt, an der Elbe und am Rhein auf Grundlage historischen Hochwassergenesen.

In den textlichen Ausführungen der Kapitel 4.1 bis 4.3 werden die in den Längsschnitten dargestellten Bandbreiten der Maßnahmenwirkungen im Planzustand 2027+ qualitativ beschrieben und quantitativ für charakteristische Streckenabschnitte entlang der Hauptströme zusammengefasst. Darüber hinaus wird auf die Maximalwerte der berechneten Scheitelreduktionen eingegangen, die überwiegend bei den größten modellierten Hochwassern auftreten. Bei ihnen kommt – wie in Kapitel 3 bereits angedeutet – typischerweise die Mehrzahl der gemeldeten Maßnahmen zum Einsatz. Sie zeigen das Potenzial, durch das Zusammenwirken vieler NHWSP-Maßnahmen außergewöhnliche Hochwasser großräumig zu beeinflussen.

4.1 Donaugebiet

Die durch NHWSP-Maßnahmen erzielbaren Scheitelreduktionen an der Donau werden für fünf historische Ereignisse und sechs skalierte Modellhochwasser in Abbildung 6 gezeigt. Bei den historischen Ereignissen (obere Gruppe an Längsschnitten) müssen lediglich beim Hochwasser im Jahr 1999 ober- und unterstrom der Lechmündung zwei gesteuerte Maßnahmen eingesetzt

⁸ Die Flussgebietsberichte für Donau (Schuh et al. 2021), Elbe (Hatz & Reeps 2021) und Rhein (Hatz et al. 2021) stellen die Modellierungsergebnisse in den drei im FuE-NHWSP untersuchten Flussgebieten und die sich daraus ergebenden flussgebietspezifischen Schlussfolgerungen ausführlich dar.

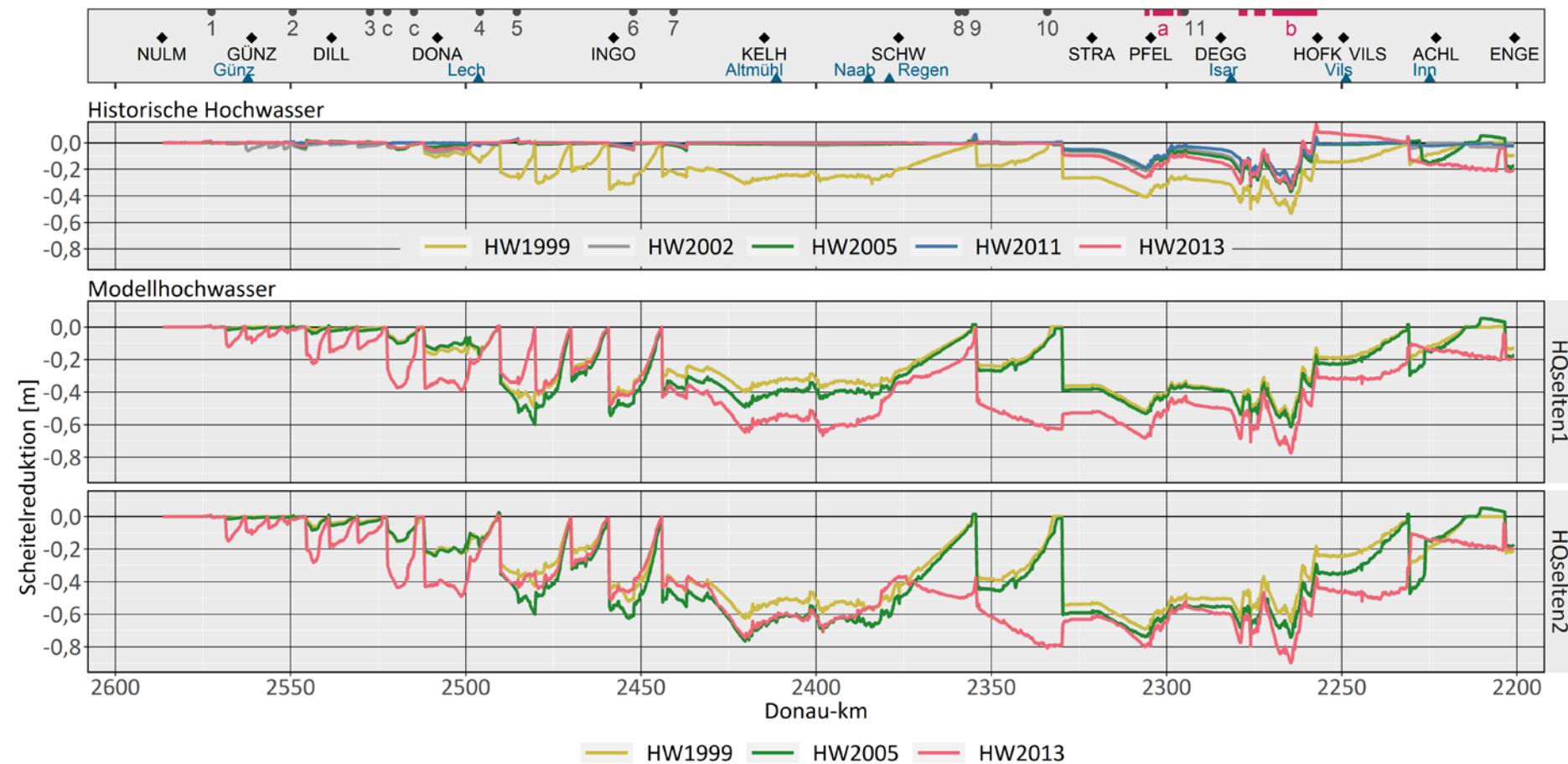
werden, wodurch auf der staugeregelten Strecke bis nach Straubing außerhalb der Stauhaltungsbereiche Scheitelreduktionen von bis zu drei Dezimetern resultieren. Unterstrom von Straubing, wo sich die großräumigen Scheitelreduktionen abschnittsweise mit Wasserstandsabsenkungen durch Deichrückverlegungen überlagern, werden Abminderungen des Wasserstands von lokal mehr als fünf Dezimetern erreicht.

Für die weiteren historischen Hochwasser (2002, 2005, 2011, 2013) kommen die an der Donau geplanten gesteuerten Rückhaltemaßnahmen nicht zum Einsatz. Die für diese Ereignisse berechneten Wasserstandsreduktionen von bis zu rund vier Dezimetern sind nur auf die Effekte der Deichrückverlegungsmaßnahmen in der Strecke zwischen Straubing und Vilshofen zurückzuführen. Die größten Wirkungen von DRV-Maßnahmen entstehen im Bereich der Maßnahmen selbst; sie laufen nach weiter oberstrom langsam aus. Im genannten Donauabschnitt werden großräumig signifikante Effekte besonders deshalb erzielt, weil sich die Teilmaßnahmen über weite Gewässerstrecken ausdehnen, unmittelbar aneinander anschließen oder auf mehreren hundert Metern überlappend geplant sind (an gegenüberliegenden Ufern). Durch die Anordnung der Teilmaßnahmen in einer solchen „Kette“ kann eine wasserstandsenkende Wirkung über größere Gewässerstrecken erreicht werden (Abb. 6), auch wenn die Beeinflussung des Scheitelabflusses gering ist.

Die insgesamt größten Scheitelreduktionen werden jedoch bei den auf HQ_{selten 1} und HQ_{selten 2} skalierten Modellhochwassern (mittlere bzw. untere Gruppe an Längsschnitten) erreicht. An den Pegeln der Donau werden Maximalwerte der Scheitelkappung von bis zu rund 8 dm (Pfelling / 2013-HQ_{selten 2}) bzw. rund 460 m³/s (Hofkirchen / ebenfalls 2013-HQ_{selten 2}) erzielt, am Inn liegt die höchste Scheitelreduktion bei rund 370 m³/s bzw. rund 6 dm am Pegel Wasserburg (2005-HQ_{selten 1}, nicht dargestellt; vgl. Schuh et al. 2021). In einzelnen Gewässerabschnitten zwischen den Pegeln des Inns ergeben sich lokal sogar Scheitelreduktionen von 8 dm (nicht dargestellt), entlang der Donau betragen die örtlichen Absenkungen der Scheitelwasserstände beim auf HQ_{selten 2} vergrößerten Ereignis des Jahres 2013 im Bereich unterstrom der Isarmündung bis zu rund 9 dm (Abb. 6). Bei diesem Ereignis handelt es sich um das größte und großräumig bedeutendste Modellhochwasser im Donaugebiet, bei dem alle an der Donau zur Verfügung stehenden Maßnahmen eingesetzt werden und für das in den meisten Donauabschnitten die größten Wasserstandsreduktionen modelliert werden.

Abschnittsbezogen lassen sich bei den analysierten Hochwassern oberstrom der Lechmündung vielfach und für große Strecken zwischen einem und vier Dezimetern Scheitelreduktion feststellen. Diese sind auf den Einsatz der Flutpolder an der Donau entsprechend der bayerischen Bewirtschaftungsstrategie (LfU BY 2019) zurückzuführen. Zwischen der Lechmündung und der Donauausbaustrecke ab Straubing erreichen diese Werte (in den nicht oder nur wenig staubeeinflussten Bereichen) oftmals drei bis sechs Dezimeter. Vergleichbare Bandbreiten ergeben sich auf der Strecke bis zur Innmündung (Szenario „nur gesteuerte Maßnahmen“; Schuh et al. 2021), wo im Planzustand 2027+ zusätzlich noch DRV-Effekte wirken.

Abbildung 6: Längsschnitte der Wasserspiegeldifferenzen an der Donau zwischen Bezugszustand und Planzustand 2027+ (alle Maßnahmen im Flussgebiet) für die 11 an der Donau modellierten Hochwasser



Die Lage der Maßnahmen der Kategorien HWR ist als schwarze Kreise bzw. der Kategorie DRV als rote Balken dargestellt. Wichtige Pegel sind mit schwarzen Rauten und Zuflüsse als blaue Dreiecke gekennzeichnet. Die Nummerierung / Bezeichnung der Maßnahmenstandorte erfolgt entsprechend der Tabellen A-1 und A-8 im Anhang. Abkürzungen erfolgen lt. Abkürzungsverzeichnis. Quelle: eigene Darstellung, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Unterstrom der Innmündung, d. h. im Abschnitt bis zur österreichischen Landesgrenze, kann der Scheitel der Donau i. d. R. nicht gezielt gekappt werden, sofern nur die gesteuerten NHWSP-Maßnahmen an der Donau für eine Scheitelkappung in den oberstrom der Innmündung liegenden Abschnitten eingesetzt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Scheitel des Inns bei allen untersuchten Ereignissen (außer 1999) nicht mit dem Donauscheitel zusammenfällt, sondern diesem vorausläuft und der Donau einen neuen, größeren und früher eintreffenden Scheitel aufprägt. Bei den Ereignissen 2005 und 2013 sowie den skalierten Modellhochwassern fällt dort die Scheitelreduktion ohne Maßnahmenberücksichtigung am Inn daher deutlich geringer aus. Beispielsweise beträgt sie am Pegel Achleiten im Falle des auf HQ_{selten 2} skalierten Hochwassers 2013 nur 15 m³/s bzw. 1 cm (vgl. Szenario „nur Maßnahmen am Hauptgewässer“ in Schuh et al. 2021). Mit Maßnahmeneinsatz im Inngebiet kann der Scheitel bei diesem Ereignis, wie in Abbildung 6 dargestellt, am Pegel Achleiten um 14 cm (218 m³/s) abgesenkt werden. Maximal liegt die in den Modellierungen erzielte Scheitelreduktion an der Landesgrenze zu Österreich bei rund 250 m³/s bzw. 23 cm.

Erstmals wurden in großräumigen Untersuchungen im Donaugebiet auch die Maßnahmen an weiteren Nebengewässern von Donau und Inn umfangreicher berücksichtigt. Dabei wurde deutlich, dass diese an den Zuflüssen eine gute und wichtige, in den beiden Hauptgewässern jedoch geringe, bei den untersuchten Hochwassern größtenteils vernachlässigbare Rolle spielen. An den Flüssen, an denen sie geplant sind, werden Scheitelabflussreduktionen von bis zu 33 % (Günz), 17 % (Isar mit Jachen), 20 % (Mangfall) bzw. Reduktionen des Wasserstands von bis zu rund 10 dm (Salzach) modelliert. Deutliche positive Wirkungen können dabei nicht nur lokal erzielt werden, sondern an den Nebenflüssen auch großräumig auftreten (z. B. an der Isar mit 95 m³/s bzw. 9 % Scheitelkappung am rund 80 km von den NHWSP-Maßnahmen entfernten Pegel München). An der Donau können bei den untersuchten Hochwassern lediglich die Hochwasserrückhaltebecken an der Günz im Falle einer günstigen Wellenüberlagerung mit der Donau einen scheitelreduzierenden Beitrag von bis zu 7 cm in der Donau leisten. Während dies in den Modellierungen einmal der Fall war, waren bei allen anderen Hochwassern keine signifikanten Wirkungen auf die Hochwasserwellen an der Donau festzustellen (Schuh et al. 2021).

4.2 Elbegebiet

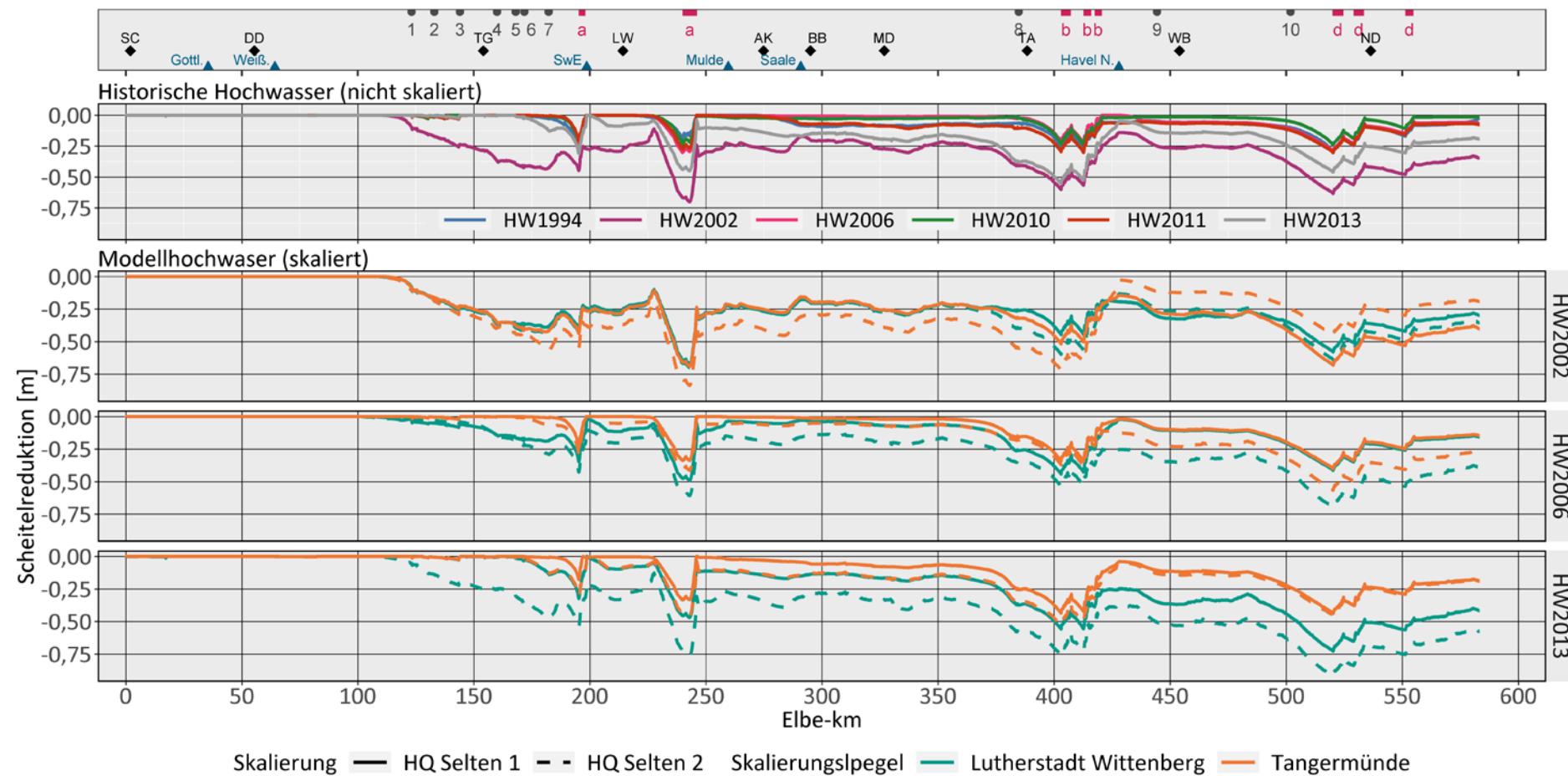
Im Gegensatz zur Donau ist an der Elbe bereits bei zwei historischen Hochwassern (2002 und 2013) ein umfangreicher Einsatz der gesteuerten Maßnahmen des NHWSP notwendig, verbunden mit einer Nutzung von jeweils mehr als 50 % des für den Planzustand 2027+ verfügbaren Speicherraums (Hatz & Reeps 2021; vgl. hierzu auch Fußnote zu Tab. 8). Hierdurch lassen sich für diese beiden Ereignisse auf großen Streckenabschnitten der Elbe Scheitelreduktionen zwischen einem und drei Dezimetern erreichen, lokal auch mehr (Abb. 7). Auch für die vier kleineren Hochwasser (1994, 2006, 2010 und 2011), bei denen die Maßnahmen der Kategorie HWR an der Elbe nicht zum Einsatz kommen, sind im Bereich der Deichrückverlegungen deutliche Wasserstandsabsenkungen zu verzeichnen. Abbildung 7 illustriert, dass – vergleichbar mit dem Donauabschnitt zwischen Straubing und Vilshofen – durch DRV-Maßnahmen Scheitelreduktionen des Wasserstands über eine größere Strecke hervorgerufen werden, wenn sich die Wirkungen der Teilmaßnahmen direkt aneinander anschließen bzw. überlagern. Typische Beispiele an der Elbe sind die Verbundmaßnahmen in Sachsen-Anhalt (lfd. Nr. b in Abb. 7) oder Niedersachsen (lfd. Nr. d), wo signifikante scheitelreduzierende Wirkungen jeweils für eine Flussstrecke von mehreren 10 km berechnet werden. Eine bedeutsame Abminderung des Scheitelabflusses können diese Maßnahmen auch an der Elbe nicht hervorrufen, da sie sich während des gesamten Anstiegs der Hochwasserwelle

bereits füllen und bereits weitgehend geflutet sind, wenn der Hochwasserscheitel erreicht wird. Darüber hinaus ist ihr Retentionsvolumen im Vergleich zur Abflussfülle des Hochwasserscheitels gering. Da ungesteuerte DRV-Maßnahmen i. d. R. mit einer Vergrößerung des Fließquerschnittes einhergehen, bewirken sie allerdings, dass sich bei gleichem Abfluss und vergleichbaren Fließgeschwindigkeiten ein niedrigerer Wasserstand einstellt (wie zuvor beschrieben).

Die ausgewiesenen Maximalwerte der Scheitelkappung betragen an den untersuchten Pegelstandorten der Elbe bis zu rund 7 dm (Neu Darchau / 2013-HQ_{selten 1}-LW) bzw. bis zu rund 840 m³/s (Lutherstadt-Wittenberg / 2002-HQ_{selten 2}-TA; Hatz & Reeps 2021). Entlang der Elbestrecke zwischen den Pegeln können die Scheitelreduktionen des Wasserstands lokal bis zu rund 9 dm betragen (2013-HQ_{selten 2}-LW; Abb. 7). Räumlich gesehen treten auch an der Elbe die größten Scheitelreduktionen dort auf, wo sich die großräumigen Abflussminderungen durch den Einsatz von HWR-Maßnahmen mit den Wasserstandsreduktionen durch DRV-Maßnahmen überlagern.

Über die gesamte Elbe hinweg lassen sich bei den in Abbildung 7 analysierten Hochwassern und unter den gegebenen Randbedingungen der Modellierung (bspw. ereignisbezogene Maßnahmensteuerung) Scheitelreduktionen feststellen, die vielfach und über lange Gewässerabschnitte Größenordnungen zwischen einem und fünf Dezimetern aufweisen. Ob bereits im Bereich der oberen Mittelelbe, beginnend mit den sächsischen und sachsen-anhaltinischen Poldern (lfd. Nr. 1-7 in Abb. 7), deutliche Scheitelreduktionen erzielt werden, hängt hauptsächlich davon ab, ob für diese Maßnahmen das lokale Einsatzkriterium erreicht wird oder ein überregionaler Einsatzfall mit Fokus auf die Elbe unterstrom von Mulde- und Saalemündung vorliegt. Letzterer ist in den Modellierungen nur für den Polder Axien-Mauken [Nr. 7] definiert. Ohne entsprechende Wirkung dieser Maßnahmen zeigt sich aus den Berechnungen des Szenarios „nur Nebengewässer“ (Hatz & Reeps 2021) deutlich, dass die Wasserstände der Elbe ab der Mulde- bzw. Saalemündung unter günstigen Umständen um bis zu rund 150 m³/s bzw. 1 dm niedriger liegen, wenn Maßnahmen an Mulde oder Saale zum Einsatz kommen. Da diese jedoch nicht zielgerichtet auf den Hochwasserscheitel der Elbe gesteuert werden (können), reduzieren die Maßnahmen die Hochwasserscheitel an den Nebenflüssen deutlich stärker. Am Pegel Wangen (Unstrut) werden um bis zu 31 %, in Halle-Trotha an der Saale um maximal 20 % und an der Mulde kurz vor der Mündung in die Elbe (Pegel Priorau) um bis zu 11 % niedrigere Scheitelabflüsse erreicht (Hatz & Reeps 2021). Abminderungen durch Maßnahmen an den Nebenflüssen an der Elbe treten vor allem bei den Hochwassern auf, bei denen der Nebenflussscheitel ungünstig zur Erhöhung des Elbescheitels beiträgt, d. h. die Hochwasserwellen mit geringem Zeitversatz aufeinandertreffen. Dies ist bei den Hochwassern 1994 und 2011 sowie allen (skalierten) Ereignissen des Jahres 2013 der Fall.

Abbildung 7: Längsschnitte der Wasserspiegeldifferenzen an der Elbe zwischen Bezugszustand und Planzustand 2027+ (alle Maßnahmen im Flussgebiet) für die 18 im FuE-NHWSP modellierten Hochwasser



Die Lage der Maßnahmen der Kategorien HWR ist als schwarze Kreise bzw. der Kategorie DRV als rote Balken dargestellt. Wichtige Pegel sind mit schwarzen Rauten und Zuflüsse als blaue Dreiecke gekennzeichnet. Die Nummerierung / Bezeichnung der Maßnahmenstandorte erfolgt entsprechend der Tabellen A-4 und A-6 im Anhang. Abkürzungen erfolgen lt. Abkürzungsverzeichnis. Quelle: eigene Darstellung, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Durch die DRV-Maßnahmen an Unstrut und Gera (lfd. Nr. *h* und *i* in Tab. A-4), die mit einer Fläche von 7800 ha in den Modellierungen berücksichtigt sind, kann sich die Hochwasserwelle in der Unstrut so abflachen, dass bei einigen der modellierten Hochwassern das Aufeinandertreffen mit dem Hochwasserscheitel der Saale zeitlich entzerrt wird. Niedrigere Abflüsse und Wasserstände in der Saale sind dann die Folge. Aktiv herbeigeführt wird ein vergleichbarer Effekt durch den mündungsnahen Polder Elster-Luppe-Aue (lfd. Nr. 18 in Tab. A-6) an der Weißen Elster, der – im Gegensatz zu den zuvor genannten DRV-Maßnahmen – primär und gezielt für den Hochwasserschutz an der Saale eingesetzt wird.

4.3 Rheingebiet

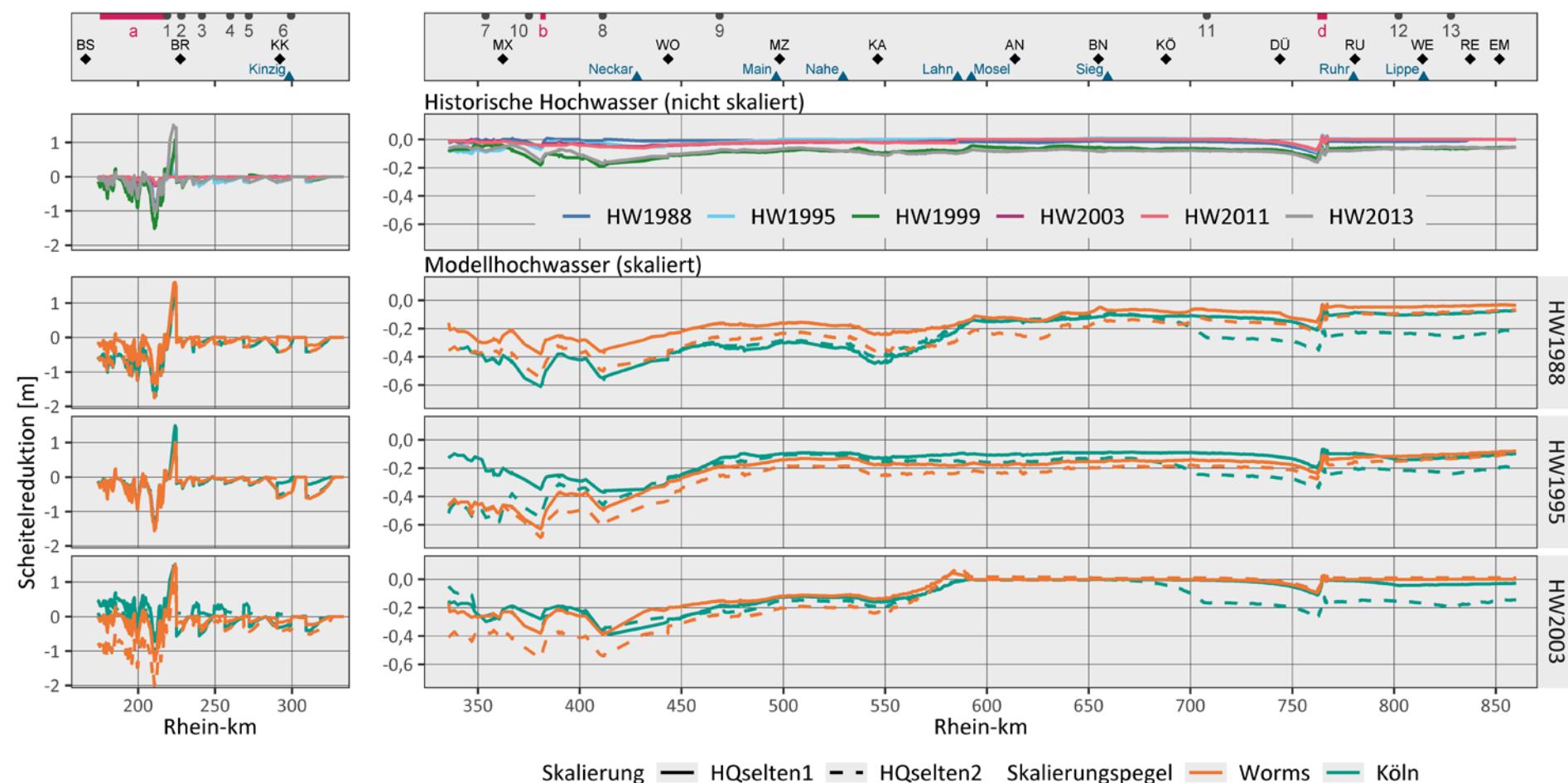
Pegelbezogen ergeben sich am Oberrhein bei Worms im Planzustand 2027+ um bis zu rund 660 m³/s (43 cm; 1995-HQ_{selten}-Worms) niedrigere Scheitel, weiter unterstrom im Mittel- und Niederrhein erreichen die berechneten Reduktionen im Maximum rund 550 m³/s (44 cm am Pegel Kaub; 1988-HQ_{selten 1}-Köln). Unterstrom der Moselmündung ergeben sich die größten Scheitelabflussreduktionen unterstrom des letzten im NHWSP gemeldeten Rückhalteraums in Nordrhein-Westfalen – sie betragen dort bis zu 690 m³/s (Pegel Emmerich; 1988-HQ_{selten 2}-Köln). Die größte Scheitelwasserstandsreduktion an einem Niederrheinpegel ist bereits in Düsseldorf mit rund 3 dm (1988-HQ_{selten 2}-Köln) festzustellen.

Entlang des freifließenden Rheins ergeben sich Maximalwerte der Scheitelkappung, die am Oberrhein zwischen Iffezheim und Bingen lokal bis zu rund 7 dm betragen können – bei vielen untersuchten Ereignissen und auf großen Streckenabschnitten werden zwischen einem und fünf Dezimetern erreicht. Am Mittelrhein werden in den durchgeföhrten Modellierungen noch Scheitelreduktionen von maximal rund 45 cm ausgewiesen; die charakteristischen Bandbreiten liegen oberstrom der Moselmündung zwischen einem und drei Dezimetern (Abb. 8).

Am Mittelrhein unterstrom der Moselmündung betragen die charakteristischen Bandbreiten zwischen null und zwei Dezimetern und sind abhängig von der hydrologischen Genese des Hochwassers. So können sie, sollte die Mosel dem Rhein keinen neuen Scheitel aufprägen oder keinen wesentlichen Abflussbeitrag zum Rheinscheitel leisten, von den eingesetzten Maßnahmen am Oberrhein profitieren, obwohl diese nicht primär im Hinblick auf den Mittel- und Niederrhein eingesetzt werden. Für diese sogenannten „Mitnahmeeffekte“, die im Wesentlichen Hochwasserscheitel unterhalb der Bemessungsereignisse betreffen, betragen die Bandbreiten an den Pegeln des Mittelrheins zwischen 8 - 24 cm, an den Niederrheinpegel zwischen 5 - 10 cm.

Für die Hochwasser, die am Niederrhein über den Bemessungsereignissen liegen und für die ein Einsatz der Maßnahmen am Niederrhein notwendig ist, können lokal bis zu etwa 35 cm Scheitelreduktion erreicht werden, über große Strecken liegen die erzielten Scheitelreduktionen zwischen zwei und drei Dezimetern.

Abbildung 8: Längsschnitte der Wasserspiegeldifferenzen am Rhein zwischen Bezugszustand und Planzustand 2027+ (alle Maßnahmen im Flussgebiet) für die 18 im FuE-NHWSP modellierten Hochwasser



Die Lage der Maßnahmen der Kategorien HWR ist als schwarze Kreise bzw. der Kategorie DRV als rote Balken dargestellt. Wichtige Pegel sind mit schwarzen Rauten und Zuflüsse als blaue Dreiecke gekennzeichnet. Die Nummerierung / Bezeichnung der Maßnahmenstandorte erfolgt entsprechend der Tabellen A-3 und A-7 im Anhang. Abkürzungen erfolgen lt.

Abkürzungsverzeichnis. Die ausgewiesenen Scheitelreduktion bezieht sich auf Wasserstände im Rheinhauptstrom. Die zwischen Kembs und Breisach am südlichen Oberrhein modellierten Scheitelreduktionen von bis zu zwei Metern (separat skalierte linker Bildteil) treten im parallel zum Rheinseitenkanal verlaufenden „Restrhein“ auf. Der modellierte Wasserstandsanstieg von deutlich über einem Meter resultiert aus dem geplanten Hochwasserbetrieb des Kulturwehrs Breisach. Quelle: eigene Darstellung, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

An den Nebenflüssen des staugeregelten Oberrheins wurde die Wirkung der im NHWSP gemeldeten DRV-Maßnahmen summarisch für alle Teilmaßnahmen an jeweils einem Gewässerabschnitt über Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM berücksichtigt; die DRV-Maßnahmen an der Nahe sowie am Main bei Flörsheim wurden in den verwendeten SOBEK-Modellen implementiert. Die übrigen, hessischen NHWSP-Maßnahmen an Nebenflüssen konnten nicht berücksichtigt werden (vgl. Hatz et al. 2021). Die an den Nebenflüssen betrachteten Maßnahmen haben gemeinsam, dass sie bei den im Rahmen des FuE-NHWSP modellierten „mittleren“ und „seltenen“ Ereignissen Hochwassern erwartungsgemäß keine signifikanten Auswirkungen auf den großräumigen Wellenablauf am Rhein und die dortigen Wasserstände hervorrufen. Auch an den Nebenflüssen selbst zeigen sie ganz unterschiedliche scheitelreduzierende Effekte, die bereits lokal mit ihren Maximalwerten zwischen wenigen Zentimetern bis hin zu mehreren Dezimetern variieren können (Szenario „nur DRV-Maßnahmen“; Hatz et al. 2021). Die Berechnungen für den geplanten Flutpolder Bergrheinfeld am Main bei Schweinfurt konnten exemplarisch zeigen, dass auch an den Nebenflüssen großräumige Maßnahmewirkungen möglich sind. Wie bereits für Donau und Elbe beschrieben, sind diese auch am Main vom Zusammentreffen der Hochwasserwellen aus Haupt- und Nebengewässer abhängig, im Fall der aufgeführten Maßnahme von den Hochwasserwellen im Main und in der Fränkischen Saale (Szenario „nur HWR-Maßnahmen“; Hatz et al. 2021).

5 Erkenntnisse aus der Modellierung

Eine flussgebietsübergreifende Zusammenfassung und Bewertung der Gesamtwirkung der im FuE-NHWSP modellierten Maßnahmen, wie sie in Kapitel 5.2 vorgenommen wird, ist dann zulässig bzw. aussagekräftig, wenn die Vorgehensweise und die wesentlichen Annahmen der Modellierung zwischen den Flussgebieten vergleichbar sind. Um dieser Anforderung Rechnung zu tragen, wurde der in Kapitel 3 beschriebene Untersuchungsansatz verfolgt. Er gibt den Flussgebieten einen Rahmen vor, innerhalb dessen die Wirkungsanalysen flussgebietsspezifisch ausgestaltet wurden. Diese Ausgestaltung war u. a. abhängig vom Kollektiv der zu modellierenden Maßnahmen und ihrem jeweiligen Planungsstand, den zur Verfügung stehenden Modellsystemen und der hydrologischen Charakteristik der jeweiligen Einzugsgebiete. Die Erfahrungen mit großräumigen (überregionalen) Nachweisrechnungen im Hochwasserschutz, die in den jeweiligen Flussgebieten ganz unterschiedlich ausgeprägt sind, spielten eine weitere wesentliche Rolle.

5.1 Vergleichbarkeit der Vorgehensweise und der Ergebnisse zwischen den Flussgebieten

In allen drei Flussgebieten wurden in der Vergangenheit für die großen Ströme mittels Modellierung die Wirkungen geplanter Hochwasserschutzmaßnahmen untersucht, die heute in Teilen zum Maßnahmenbestand des NHWSP gehören⁹. Die langjährigsten und am stärksten institutionalisierten Erfahrungen existieren dabei im Rheingebiet, wo seit Ende der 1970er-Jahre (HSK 1978) im Rahmen internationaler Gremien und Arbeitsgruppen staatsvertraglich begründete Nachweisrechnungen durchgeführt werden (bspw. IKSР 2012, SK 2020). Diese Untersuchungen verfolg(t)en ganz konkret formulierte, quantifizierbare Ziele (Wiederherstellung eines definierten Hochwasserschutzniveaus, Reduktion des Hochwasserrisikos um einen festgelegten Betrag), während bei vergangenen Untersuchungen an Elbe und Donau – wie auch beim FuE-NHWSP – vielfach ein weiter gefasster Forschungscharakter im Vordergrund stand. Aufgrund dieser unterschiedlichen Ausgangssituation besitzen die Bundesländer in den verschiedenen Flussgebieten unterschiedliche Blickwinkel auf das für das NHWSP durchgeföhrte FuE-Vorhaben und können bzw. müssten trotz vergleichbarem Vorgehen zu einer unterschiedlichen Bewertung der Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen kommen. Verschiedene Blickwinkel und Schlussfolgerungen wirkten für den Diskussionsprozess im FuE-NHWSP bereichernd und bieten nun einen weiteren Ausgangspunkt für den Austausch von Erfahrungen oder die Annäherung von Sichtweisen.

Vergleichbare Randbedingungen liegen in den Flussgebieten im Hinblick auf die Maßnahmen vor, die mit den vorliegenden Modellen (Abb. 5) abgebildet werden können. Es wurde erreicht, dass in den im FuE-NHWSP derzeit genutzten Modellsystemen 90 % bis 100 % der gemeldeten Maßnahmen in der Kategorie HWR berücksichtigt werden (Tab. 8); die Maßnahmen an den Hauptströmen werden dabei jeweils vollständig und in hydrodynamisch-numerischen Modellen implementiert. Dies gilt weitgehend auch für die DRV-Maßnahmen. Unter anderem aufgrund von unterschiedlichen Modellverfügbarkeiten (Kap. 3.3) ergibt sich an den Nebengewässern im Einzugsgebiet bzgl. Umfang und Art der Maßnahmenimplementierung ein deutlich heterogeneres und unvollständigeres Bild. Die dort vorgenommenen Modellierungen leisten zwar einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der großräumigen

⁹ Kapitel 2 der drei Flussgebietsberichte für Donau, Elbe und Rhein (Hatz & Reeps 2021, Hatz et al. 2021, Schuh et al. 2021) geht ausführlich auf die Historie großräumiger modellbasierter Wirkungsanalysen ein und legt die Ausgangssituation für die Arbeiten im FuE-NHWSP dar.

Wirkungszusammenhänge, ein lückenloses Gesamtbild über die Wirkung der an den Nebenflüssen gemeldeten Maßnahmen ergibt sich jedoch in keinem der drei Flussgebiete.

Die zum Teil nicht (detailliert) vorliegenden Informationen über die großräumigen Maßnahmenwirkungen an den Nebenflüssen sind nicht nur durch die teilweise nicht vorhandenen Modellierungen im FuE-NHWSP begründet, sondern lassen sich auch auf die räumlich unterschiedlich aufgelösten Modelle sowie die darin erfolgte Abbildung der Maßnahmen zurückführen (Kap. 3.4). Einen weiteren, wesentlich bedeutsameren Aspekt stellt jedoch die in der Modellierung verwendete hydrologische Datengrundlage dar. Mit der Nutzung von fünf bzw. sechs historischen Hochwassern und zwölf darauf basierenden, künstlich vergrößerten Modellereignissen (Kap. 3.2) konnte an den Hauptströmen zumeist eine relevante Auswahl an Hochwasserverläufen mit niedriger und mittlerer Eintrittswahrscheinlichkeit modelliert werden. An den Nebenflüssen resultieren aus dieser Auswahl teilweise nur wenige bzw. nur einzelne Hochwasser, bei denen ein Einsatz der im NHWSP dort gemeldeten Maßnahmen in Frage kommt. Eine systematische Analyse der Wirkung der Nebenflussmaßnahmen auf außergewöhnliche Hochwasser am Hauptstrom war deshalb in keinem der untersuchten Flussgebiete möglich. Für die wenigen möglichen Nachweise, die somit eher exemplarischen Charakter hatten, wurden in den Flussgebieten unterschiedliche Strategien verfolgt (z. B. Auswahl einer größeren Zahl an Skalierungspegeln für die Skalierung der Modellhochwasser, Modellierung von Sonderszenarien, Auswahl einzelner regional bedeutsamer Ereignisse), die zumindest in Einzelfällen die Erkenntnislage für die Nebenflussmaßnahmen verbessern konnten.

Im Fokus der Generierung der skalierten Modellhochwasser stand im FuE-NHWSP schlussendlich das Ziel, dass möglichst viele Maßnahmen aktiviert werden, um ihr Zusammenwirken im Verbund untersuchen zu können. Die für das FuE-NHWSP getroffene Festlegung, an den jeweiligen Skalierungspegeln Modellhochwasser mit Scheitelabflüssen zu erzeugen, die zwischen 10 % und 20 % höher liegen als die festgelegten HQ₁₀₀-Abflüsse (Kap. 3.2.2), garantiert dies und trägt dazu bei, dass in den Modellierungen weitestgehend davon ausgegangen werden kann, dass Deiche nicht großräumig versagen bzw. überströmt werden. Eine Vergleichbarkeit zwischen den Flussgebieten im Detail resultiert hieraus jedoch nicht, da sich die Ausnutzung des vorgegebenen Rahmens (10 - 20 %) in Abhängigkeit von den Hochwassergesetzen im Einzugsgebiet, den in den Flussgebieten bereits im Bezugszustand existierenden Hochwasserrückhaltemaßnahmen, den Eigenschaften der als Grundlage für die Skalierung verwendeten HQ₁₀₀-Werte (bzgl. Einfluss von Maßnahmen, Bemessungsrelevanz oder Hydrologie; vgl. Kap. 3.2.2) und den Einsatzkriterien der Maßnahmen sehr verschieden gestaltete. Mit Hilfe der Modellhochwasserskalierung wurden an den Hauptströmen jeweils Ereignisse generiert, die entweder nur in einzelnen Streckenabschnitten oder aber entlang des gesamten Hauptstroms von herausragender Bedeutung sind. Die jeweils größten modellierten Modellhochwasser in den Flussgebieten haben gemeinsam, dass Maßnahmen entlang der gesamten Gewässerstrecke des Hauptstroms und an einer Vielzahl an Nebengewässern zum Einsatz kommen. Für diese wurden auch die bedeutendsten großräumigen Maßnahmenwirkungen berechnet, die in Kapitel 4 beschrieben sind.

Der Einsatz gesteuerter Maßnahmen erfolgt in allen drei Flussgebieten unter weitestgehend vergleichbaren Randbedingungen (Kap. 3.4). Grundlage sind die Einsatzkriterien, die von den Bundesländern für die Modellierung der Maßnahmen im FuE-NHWSP (nach verfügbarem Kenntnisstand) festgelegt wurden. Diese Kriterien können sich nach lokalen bzw. regionalen, aber auch nach überregionalen Erfordernissen richten, und sich auf Einzelmaßnahmen oder zusammengehörige Maßnahmengruppen beziehen. Für die Maßnahmen am Oberrhein zwischen Basel und Worms liegt aus den zuständigen deutsch-französischen Gremien der Ständigen

Kommission ein überregionales, eindeutiges Steuerungsreglement für die existierenden und geplanten Maßnahmen vor, das auf einer Vielzahl an Modellhochwassern erarbeitet, validiert und festgelegt wurde sowie bei Erfordernis (z. B. bei Fertigstellung einer neuen Maßnahme) weiterentwickelt wird. Solche abgestimmten konkreten Vorgaben liegen für die geplanten Maßnahmen an der Elbe und der Donau (noch) nicht vor bzw. sind auch nicht vorgesehen, weil dort (bspw. an der Donau) zum Teil eine Bewirtschaftung mittels ereignisbezogener Steuerung angestrebt wird. Im FuE-NHWSP wurde deshalb bei Überschreiten der jeweiligen Einsatzkriterien der Maßnahmen die in Kapitel 3.4 beschriebene ereignisbezogene „ex post“ getroffene Maßnahmensteuerung vorgenommen. Nur aus Gründen der flussgebietsübergreifenden Vergleichbarkeit wurde für die NHWSP-Maßnahmen am Oberrhein im Rahmen des FuE-NHWSP ebenfalls die ereignisbezogene Maßnahmensteuerung angesetzt.

5.2 Gesamtwirkung und Merkmale für „Überregionalität“

Auch wenn sich die Modellierungen in den drei betrachteten Flussgebieten, wie in Kapitel 3 beschrieben, hinsichtlich zahlreicher Details in der Vorgehensweise unterscheiden, so sorgt der gesetzte Untersuchungsrahmen (und die dadurch enthaltenen Gemeinsamkeiten, Kap. 5.1) doch dafür, dass auch flussgebietsübergreifend gemeinsame Schlussfolgerungen zu den Wirkungen der Maßnahmen des NHWSP getroffen werden können. Allen drei Flussgebieten ist gemeinsam, dass die im NHWSP gemeldeten Maßnahmen dafür sorgen können, dass über die gesamte durch Maßnahmen beeinflussbare Strecke der Hauptströme Donau (inkl. Inn), Elbe und Rhein eine signifikante Reduktion der untersuchten außergewöhnlichen Hochwasserscheitel erfolgt. Für eine Vielzahl der im FuE-NHWSP betrachteten Hochwasser und über große Streckenabschnitte hinweg betragen die ermittelten Wirkungen auf die Scheitelwasserstände zwischen einem und fünf Dezimetern. Sie können in Einzelfällen oder an einzelnen Gewässerstandorten zudem beträchtlich größer sein, wenn sich Maßnahmenwirkungen besonders überlagern oder hydrologische bzw. hydraulisch-morphologische Gegebenheiten dies befördern (Kap. 4).

Aufgrund der beschriebenen Einschränkungen, u. a. bzgl. der Auswahl an hydrologischen Ereignissen und der Verfügbarkeit von Modellen, ergibt sich für die Wirkungen an den Nebenflüssen kein lückenloses Bild. In allen drei Flussgebieten haben die im NHWSP gemeldeten Maßnahmen an den Nebenflüssen im Einzugsgebiet bei den untersuchten Hochwassern überwiegend keine signifikanten Auswirkungen auf die Scheitel der großen Ströme selbst. Nicht für alle, aber für viele Maßnahmen konnte (teilweise exemplarisch, teilweise auch umfassender) gezeigt werden, dass ihre Auswirkungen vor Ort beträchtliche (mehrere Dezimeter) und großräumige (auf mehreren 10 km bis über 100 km) positive scheitelreduzierende Wirkungen hervorrufen können. Dies erbrachte wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf die Frage, inwieweit die Wirkungen der Maßnahmen des NHWSP im Gesamten oder die positiven Effekte einzelner Maßnahmen an Haupt- und Nebengewässern entsprechend den Zielen des NHWSP als „überregional“ bezeichnet werden können.

Grundsätzlich bestätigen die Modellierungen des FuE-NHWSP aber auch, dass der Reichweite der Wirkungen von gesteuerten (Abfluss- und Wasserstandsreduktion vor Ort und nach unterstrom) und ungesteuerten Maßnahmen (Wasserstandsreduktion vor Ort und nach oberstrom) auf Hochwasserscheitel in der Regel natürliche oder maßnahmenbedingte Grenzen gesetzt sind. Die Hochwassergenese im Einzugsgebiet definiert solche Grenzen bspw. dann, wenn (a) Nebenflüsse ihrem Hauptgewässer einen zusätzlichen und bedeutenderen Hochwasserscheitel aufprägen können oder (b) im Gegensatz dazu der Abflussbeitrag bzw. der Zeitpunkt eines Zuflusses so gering ist bzw. zeitlich so versetzt erfolgt, dass er für das Gewässer, in das er einmündet, nur von untergeordneter Relevanz ist. Der sich einstellende Wellenablauf kann die Effekte von jeweils oberstrom gelegenen gesteuerten Maßnahmen im (a) Haupt- oder

(b) Nebengewässer somit deutlich beschränken. Maßnahmenbedingte Grenzen können z. B. bei kleineren DRV-Maßnahmen oder generell bei Einzelmaßnahmen erreicht werden, wenn bei sehr großen Hochwasserereignissen das / die geschaffene Rückhaltevolumen/-fläche im Vergleich zur Abflussfülle des Wellenscheitels klein ist und die Maßnahme und ggf. nur in geringem Maße wirkt. Dies unterstreicht die Bedeutung sowohl des Zusammenspiels mehrere Maßnahmen an einem längeren Gewässerabschnitt als auch eines ausgeklügelten überregionalen Steuerungsreglements (vgl. Kap. 5.4).

Bewertet man die im NHWSP gemeldeten Maßnahmen bzgl. ihrer Konzepte, die zuvor aufgeführten typischen Wirkungsgrenzen zu überschreiten, dann lassen sich daraus auf qualitativer Betrachtungsebene **Merkmale für überregional wirksame Maßnahmen** ableiten. Einer Maßnahme kann demnach aus hydrologisch-hydraulischer Sichtweise ein überregionaler Charakter zugesprochen werden, wenn ...:

- ▶ ... ihr Standort so gewählt ist, dass ein günstiges Aufeinandertreffen bzw. eine geeignete Ausprägung (Abflussfülle, Scheitelhöhe) der Hochwasserwellen aus Haupt- und Nebengewässern (regelmäßig) eine Fortpflanzung der Maßnahmenwirkung im Scheitel (Scheitelreduktion) über eine hydrologische Grenze hinweg befördert.
- ▶ ... ihr Einsatzkonzept explizit darauf ausgelegt ist, begrenzte hydrologische Wirkbereiche (s.o.) zu erweitern, bspw. indem Maßnahmen an Haupt- oder Nebengewässern so gesteuert werden, dass sie vor allem nach dem Zusammenfluss die jeweils angestrebte Wirkung hervorrufen.
- ▶ ... ihr(e) Rückhaltefläche/-volumen (gilt v. a. für DRV-Maßnahmen) so projektiert ist, dass es der Größenordnung der Fülle der Hochwasserscheitel an einem Gewässer nahekommt und damit auch eine Beeinflussung des Scheitelabflusses nach unterstrom erfolgen kann.
- ▶ ... sie als lokale Maßnahme (gilt v. a. für DRV-Maßnahmen) auf günstige Weise mit anderen (lokalen) Maßnahmen kombiniert wird, so dass sich daraus über einen besonders (für Einzelmaßnahmen untypisch) großen zusammenhängenden Gewässerabschnitt signifikante Wirkungen auf Scheitelwasserstände ergeben.
- ▶ ... wenn sie maßgeblicher Bestandteil eines aus mehreren Maßnahmen bestehenden Gesamtkonzeptes ist, das nachgewiesenermaßen und insbesondere auf großräumige Wirkungen abzielt.

Diesen Merkmalen folgend, wird deutlich, dass überregionale Maßnahmen(wirkungen) nicht zwangsläufig mit Effekten am bzw. auf den Hauptstrom verbunden sein müssen, sondern auch an den Nebengewässern im Einzugsgebiet auftreten können. Wie stark ausgeprägt sie bzw. der überregionale Charakter einer Maßnahme ist, lässt sich quantitativ nur über hydraulisch-hydrologische Modellierungen (auch zu Einzelmaßnahmen) bestimmen. Brust (2018) zeigt bspw. auf, dass über die hydraulisch-hydrologischen Aspekte hinaus weitere Kriterien zur Kennzeichnung und Bewertung von überregionalen Maßnahmenwirkungen im Hochwasserschutz herangezogen werden können (bspw. Auswirkungen auf Schadenspotenziale oder das Hochwasserrisiko, Flexibilität und Robustheit von Maßnahmen). Dies eröffnet den Übergang zu integrierten Konzepten der Daseinsvorsorge, die Synergien mit weiteren Handlungsfeldern aufspannen und einen risikobasierten Ansatz in den Blick nehmen (Kap. 6). Der Fokus der Modellierungen im FuE-NHWSP lag jedoch auf den hydraulisch-hydrologischen Wirkungen der Maßnahmen, vor allem im Verbund. Trotzdem geben die in den Flussgebietsberichten dargestellten Ergebnisse auch Hinweise zu den modellierten

Einzelmaßnahmen und zeigen, dass ihr überwiegender Anteil eines oder mehrere der aus dem FuE-NHWSP entwickelten qualitativen, überregionalen Merkmale vorweisen kann.

5.3 Hinweise zum Kriterium „Wirksamkeit“ für die Auswahl und Priorisierung von Maßnahmen im NHWSP

Die durchgeführten Wirkungsanalysen des FuE-NHWSP liefern auch zu den in Kapitel 2.2 erläuterten LAWA-Kriterien zur Identifizierung und Priorisierung von raumgebenden Maßnahmen im NHWSP Hinweise für eine mögliche Präzisierung, vor allem für das Kriterium „Wirksamkeit“. Die Wirksamkeit wird über den Anteil der durch eine Maßnahme bevorteilten Einwohner im Verhältnis zu den durch ein seltenes bzw. extremes Ereignis in den einzelnen Flussgebieten insgesamt betroffenen Einwohnern berechnet (LAWA 2015).

Zur Ermittlung der durch eine NHWSP-Maßnahme bevorteilten Einwohner wird derzeit von folgenden Randbedingungen ausgegangen (LAWA 2015):

- ▶ Bei Deichrückverlegungen (DRV) in den Nebengewässern ist von der Wirksamkeit der Maßnahmen bis zum Hauptstrom auszugehen.
- ▶ Bei Deichrückverlegungen (DRV) in Hauptgewässern ist von der Wirksamkeit der Maßnahmen bis zur Tidegrenze bzw. Staatsgrenze auszugehen.
- ▶ Bei gesteuerten Hochwasserrückhaltungen (HWR) in Neben- und Hauptgewässern ist von der Wirksamkeit der Maßnahmen bis zur Tidegrenze bzw. Staatsgrenze auszugehen.

Die beschriebenen Randbedingungen ermöglichen bisher – d. h. vor allem in der frühen Phase des NHWSP und bei fehlender Verfügbarkeit belastbarer Daten zur überregionalen Wirksamkeit der Maßnahmen – eine einfache und transparente Handhabbarkeit des Auswahl- und Priorisierungsverfahrens (LAWA 2015). Mit dem Abschluss des FuE-NHWSP und den gleichermaßen voranschreitenden Planungen bei den Maßnahmenträgern liegen nun Erkenntnisse vor (siehe bspw. Kap. 5.2), um die bisher genutzten Randbedingungen für das Kriterium „Wirksamkeit“ überprüfen und die Vorgaben für seine Berechnung aktualisieren zu können.

Im Hinblick auf die zuvor beschriebenen Annahmen zur räumlichen Erstreckung einzelner Maßnahmenwirkungen zeigte sich in den Modellberechnungen des FuE-NHWSP Folgendes:

- ▶ Nur bei einer einzigen Deichrückverlegungsmaßnahme (DRV) konnte eine sehr maßgebliche Beeinflussung des Scheitels nach unterstrom der Maßnahme nachgewiesen werden (da ihr Volumen signifikant im Verhältnis zum Volumen der Hochwasserwelle ist; Hatz & Reeps 2021). Bei der überwiegenden Zahl der untersuchten Deichrückverlegungen an Haupt- und Nebengewässern ist – statt von einer Wirksamkeit nach unterstrom – entsprechend den Gesetzen der Gerinnehydraulik nur von Wirkungen der Maßnahmen auf die Scheitelwasserstände vor Ort und nach oberstrom auszugehen. Während sich die Wirkung vor Ort i. d. R. über die Erstreckung der Maßnahme am Gewässer verlässlich abschätzen lässt, hängen die Effekte nach oberstrom von der hydraulischen Charakteristik des sich oberstrom anschließenden Gerinnes ab (Querschnitt, Gefälle, Engstellen) und können (ebenso wie mögliche Wirkungen nach unterstrom) nur durch individuelle hydraulische Berechnung nachgewiesen werden.
- ▶ Deichrückverlegungsmaßnahmen (DRV) im Verbund können vor allem dann eine großräumige (überregionale) Maßnahmenwirkung erzeugen, wenn sich die Wirkungen der Teilmaßnahmen unmittelbar aneinander anschließen bzw. sich überlagern (vgl. Kap. 4.1 und

4.2). Auch können DRV-Maßnahmen im Verbund mit HWR-Maßnahmen zur Zielerreichung beitragen, wenn bspw. deren abflussverzögernde Wirkung die Hochwasserwelle derartig verformt, dass bei einem Zusammentreffen der Hochwasserwelle im Hauptstrom mit Hochwasserwellen aus den Nebenflüssen der resultierende Scheitel zusätzlich gemindert wird.

- ▶ Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann bei gesteuerten Hochwasserrückhaltemaßnahmen (HWR) von einer signifikanten Wirkung auf die unterstrom ablaufende Hochwasserwelle mindestens bis zur Einmündung des nächsten, hydrologisch bedeutsamen Nebenflusses ausgegangen werden (siehe Kap. 5.2). Verlässliche darüber hinaus reichende Wirkungen können sich dann ergeben, wenn die typischen Hochwassergesetze ein günstiges Aufeinandertreffen von Hochwasserwellen und Maßnahmenwirkungen bedingen oder die Kriterien für den Maßnahmeneinsatz eine spezielle, überregionale Komponente besitzen. Letzteres ist bereits bei vielen im NHWSP gemeldeten Maßnahmen der Fall (siehe bspw. LfU BY 2019, SK 2020), von einer grundsätzlichen Wirkung bis zur Tide-/Staatsgrenze sollte aus hydrologisch-hydraulischer Sichtweise jedoch nicht ausgegangen werden.
- ▶ Für mehrere der gesteuerten Hochwasserrückhaltungen in Nebenflüssen konnten maßgebliche Effekte auf die Scheitel in den direkten Vorflutern nachgewiesen werden (z. B. Havelpolder für die Elbe, Flotpolder am Inn für die Donau). Auch dies ist hauptsächlich dann der Fall, wenn spezifische Einsatzkonzepte vorliegen oder die hydrologische Charakteristik der Einzugsgebiete hierfür günstige Voraussetzungen schafft (vgl. Kap. 5.2).

Auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse aus dem FuE-NHWSP besteht somit die Möglichkeit, die verwendeten Randbedingungen zur Berechnung des Kriteriums „Wirksamkeit“ zu präzisieren bzw. zu verbessern (s. o.) oder auf Basis der in Kapitel 5.2 beschriebenen Merkmale um neue Aspekte zu erweitern.

5.4 Möglichkeiten zur Optimierung des Untersuchungsansatzes

Vergleichbar zur bedarfsweisen Fortschreibung der Nachweisrechnungen am Rhein (EG HVal der IKSР, UAG Wirksamkeit SK) kann es auch im NHWSP zielführend sein, die großräumigen modellbasierten Wirkungsanalysen im Bedarfsfall zu wiederholen oder auf weitere Flussgebiete zu erweitern (Kap. 5.5), bspw. um die (beschleunigte) Umsetzung der Maßnahmen des NHWSP im Sinne eines Monitorings zu begleiten und die bis dato bereits realisierten sowie die noch umzusetzenden Maßnahmen des Programms mit ihrer Wirkung zu quantifizieren (weitere Ausführungen hierzu in Kap. 6). Voraussetzung hierfür ist es, die in Kapitel 5.1 beschriebenen Defizite zu beheben, um die Maßnahmenwirkungen noch systematischer und damit realistischer ausweisen zu können. Folgende Verbesserungen können hierzu beitragen:

- ▶ Durch eine **Erweiterung des Modellsystems** um relevante Gewässerstrecken bzw. Flussgebiete können die im FuE-NHWSP noch nicht modellierten (u. a. Tab. 8) oder zukünftig neu gemeldeten Maßnahmen berücksichtigt werden. In den drei im FuE-NHWSP betrachteten Flussgebieten wird der Fokus auf die Maßnahmen an den Nebengewässern damit weiter gestärkt und eine vollständigere Einschätzung zum überregionalen Charakter dieser Maßnahmen kann gewonnen werden. Die Aussagekraft der Modellergebnisse erhöht sich darüber hinaus, wenn Analysen durch die Nutzung geeigneter hydrodynamisch-numerischer Modelle auch an den Nebengewässern strecken- anstatt pegelbezogen getroffen werden (vgl. Flussgebietsberichte).
- ▶ Insbesondere die überregionalen Wirkungen der gesteuerten Maßnahmen können noch realitätsnäher quantifiziert werden, wenn mit sukzessive fortschreitender

Maßnahmenplanung in den Flussgebieten nach Möglichkeit **überregionale Einsatz- und Steuerungskonzepte** (bspw. nach dem Vorbild des Oberrheins oder der Bewirtschaftungsstrategie für die Flutpolder an der Donau) erarbeitet bzw. konkretisiert werden. Robuste Steuerungsreglements können in den Modellberechnungen dort, wo sie in Realität auch zum Einsatz kommen, verwendet werden. Bei der Abbildung ereignisbezogener Steuerungskonzepte in den Modellberechnungen könnte die Berücksichtigung von Schätzwerten für die Prognoseunsicherheiten in der Wetter- bzw. Hochwasservorhersage die im FuE-NHWSP vorgenommene Modellierung in Kenntnis des gesamten Hochwasserverlaufs („perfekte Vorhersage“) ersetzen. Herausforderungen können in diesem Zusammenhang auch in der Implementierung von bei besonders extremen Hochwassern zu erwarten Deichbrüchen liegen.

- ▶ Die **Erhöhung der Anzahl an Modellhochwassern** kann einen Beitrag sowohl zur realitätsnäheren als auch systematischeren Quantifizierung der NHWSP-Wirkung leisten. Durch die Ergänzung um weitere relevante historische Hochwassergesenen oder basierend auf Erkenntnissen aus der Klimafolgenforschung zu zukünftig möglichen meteorologisch-hydrologischen Konstellationen (siehe bspw. Hofstätter et al. 2015) lässt sich die Vielfalt der untersuchten Wellenabläufe auch in den Nebengewässern erhöhen, so dass Aussagen zur großräumigen Maßnahmenwirkung im Verbund dort nicht mehr nur aus wenigen exemplarischen Ereignissen resultieren. Durch eine größere Bandbreite an berücksichtigten Scheitelabflüssen (vgl. IKSR 2012) können die Untersuchungen darüber hinaus den unterschiedlichen Einsatzzielen der im NHWSP gemeldeten Maßnahmen besser gerecht werden.

Die aufgeführten Vorschläge können zu einer Verbesserung des bisher im FuE-NHWSP umgesetzten Untersuchungsansatzes für hydraulisch-hydrologische Wirksamkeitsnachweise führen, sie resultieren allerdings auch in einem erhöhten Aufwand für die Analysen in den Flussgebieten. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn zukünftig im Rahmen des NHWSP möglicherweise Ziele verfolgt werden, die über die Quantifizierung der hydraulisch-hydrologischen Wirkungen hinaus das Hochwasserrisiko und dessen Minderung oder ggf. weitergehend eine handlungsfeldübergreifende integrierte Gewässerentwicklungsplanung in den Fokus nehmen. Einen Ausblick hierauf gibt Kapitel 6.2.

5.5 Übertragbarkeit der verwendeten Vorgehensweise auf die Flussgebiete der Oder und der Weser

Neben den im FuE-NHWSP betrachteten Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein sind im NHWSP auch raumgebende Maßnahmen im Einzugsgebiet der Weser und an der Oder gemeldet (Kap. 2.2). Für diese (und weitere Flussgebiete) lässt sich der in Kapitel 3 vorgestellte und bei Bedarf weiter zu optimierende Untersuchungsansatz ebenfalls anwenden.

Direkt unterstrom der Neiße-Mündung, wo die Oder zum deutsch-polnischen Grenzfluss wird, sind die beiden Flutpolder „Neuzeller Niederung“ und „Ziltendorfer Niederung“ mit einem Gesamtvolumen von bis zu 113 Mio. m³ im NHWSP gemeldet. Welcher Anteil dieser Volumina unter Berücksichtigung des Raumwiderstands tatsächlich für den Hochwasserrückhalt genutzt werden kann, ist Teil der laufenden Untersuchungen und Planungsarbeiten. Auf Grundlage der bisher vorliegenden Untersuchungen (bspw. BfG 2014a, Scholz & Lewis 2014) ist von einer überregionalen Wirkung auf die Unterlieger an der Oder auszugehen. Es ist ebenso davon auszugehen, dass die Maßnahmenwirkungen mit einem geeigneten hydrodynamisch-numerischen Modell für die Oder methodisch problemlos ermittelt werden können.

Die im **Wesergebiet** gemeldeten raumgebenden Maßnahmen machen 0,2 % des gesamten im NHWSP gemeldeten Volumens in der Kategorie HWR (2,1 Mio. m³) und 1,6 % (532 ha) der bundesweiten DRV-Fläche aus (Tab. 1 und 2). Keine der Maßnahmen liegt direkt an der Weser – sie befinden sich in ihrem Einzugsgebiet an den Quell- und Zuflüssen Werra, Eder und Werre und ähneln (bezogen auf Typ, räumliche Lage und Größe) denjenigen Maßnahmen im Donau-, Rhein- und Elbegebiet, die im Zuge der großräumigen Wirkungsanalysen im FuE-NHWSP mit nachgeordneter Priorität, vereinfacht oder gar nicht berücksichtigt wurden (vgl. Kap. 2.2 und 5.1) und denen aufgrund der vorliegenden Modellierungsergebnisse lediglich eine untergeordnete Bedeutung für den jeweiligen Hauptstrom beigemessen wurde. Dementsprechend wird für mögliche Nachweisrechnungen zu den NHWSP-Maßnahmen im Wesergebiet ein zweistufiges Verfahren empfohlen, das (bei Bedarf modellbasiert) zuerst Aussagen zu überregionalen Wirkungen der Maßnahmen an den Nebenflüssen trifft, ehe darauf basierend (falls notwendig) die Maßnahmenwirkungen im Hinblick auf Hochwasser an der Weser untersucht werden.

Für das Wesergebiet betreibt die BfG ein großräumiges hydrodynamisch-numerisches 1D/2D-Modellsystem, bestehend aus den Hauptflüssen Weser, Werra und Fulda (Hydrotec 2020, HKV 2009) auf der Strecke der Bundeswasserstraßen. Für die Oder liegt in der BfG derzeit kein einsatzfähiges HN-Modell vor.

6 Ausblick

Mit Abschluss des im vorliegenden Bericht dokumentierten FuE-Vorhabens im Jahr 2020 tritt die fachliche Begleitung des NHWSP in eine neue Phase ein. Im Rahmen eines dauerhaft angelegten Beratungs- und Modellierungsdienstes („NHWSP/eNHWSP-Dienst“) wird die Bundesanstalt für Gewässerkunde das Bundesumweltministerium und die Bundesländer bei der Fortschreibung und Weiterentwicklung des NHWSP unterstützen. Die weitgehende Realisierung der Maßnahmen des NHWSP wird eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen, da Planung, Genehmigung und Bauabwicklung von derartigen Großprojekten ein hohes personelles und finanzielles Engagement erfordern (vgl. Buschhäuser et al. 2018). Die Arbeiten der BfG sollen u. a. dazu beitragen, die in den Ad-hoc-Untersuchungen (BfG 2014a, BfG 2016) und dem FuE-Vorhaben ermittelten Wirkungen der im NHWSP gemeldeten raumgebenden Maßnahmen in ihrer fortgesetzten Umsetzung kontinuierlich belastbar untersuchen zu können. Darüber hinaus liefern sie Beiträge, um das bundesweite Hochwasserrisikomanagement – für das das NHWSP ein wichtiger Baustein ist – fortzuentwickeln. Ein erster Ausblick auf mögliche zukünftige Schwerpunkte dieser Arbeiten, die sich unmittelbar aus den Erkenntnissen des FuE-NHWSP ergeben können und die im Frühjahr 2021 gemeinsam im Rahmen eines Abstimmungsgesprächs zwischen Bund und Bundesländern erörtert werden sollen, wird in den folgenden Kapiteln dargestellt.

6.1 Hydraulisch-hydrologische Nachweisrechnungen

In den in Kapitel 5 bewerteten Ergebnissen des FuE-NHWSP spiegelt sich – sowohl bezogen auf die quantitative Gesamtwirkung des Programms an den Hauptströmen als auch qualitativ im Hinblick auf die Wirkungen der Einzelmaßnahmen – eine überwiegend starke überregionale Komponente wider. Es konnte gezeigt werden, dass die Mehrzahl der von den Bundesländern geplanten und im NHWSP gemeldeten Maßnahmen einen überregionalen Charakter besitzt und somit dem Ziel des NHWSP, das Solidaritätsprinzip zwischen Ober- und Unterliegern zu fördern, gerecht wird (Kap. 5.2).

Mit den Hinweisen zur Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Vorgehensweise zwischen verschiedenen Flussgebieten sowie den Vorschlägen zur Verbesserung des bisher gewählten Untersuchungsansatzes wird in Kapitel 5 ein klarer Fokus auf die Fortschreibung der Nachweisrechnungen gelegt. Eine regelmäßige Analyse der Maßnahmenwirkung ist vor allem dann wichtig, wenn sich Anzahl, Art und räumliche Verteilung der Maßnahmen im Zuge der Fortschreibung der Maßnahmenliste des NHWSP in einem Flussgebiet deutlich ändern und wenn wesentliche Flächen- und Volumenbestandteile baulich umgesetzt bzw. einsetzbar sind. Mit zunehmender Zahl von Maßnahmen gewinnt die Entwicklung eines überregional abgestimmten Steuerreglements an Bedeutung. Die bedarfsgerechte Entwicklung, Fortschreibung oder Konkretisierung überregionaler Bewirtschaftungsstrategien in den Flussgebieten sowie die Verbesserung von zur Verfügung stehenden Modellierungsansätzen (die bspw. die Möglichkeit bieten, die Effekte von Vorhersageunsicherheiten besser abzubilden) können ebenfalls Anlass für erneute Nachweisrechnungen sein.

Zu empfehlen ist eine Fortschreibung aber auch, um die in allen bisher analysierten Flussgebieten vorhandenen Unsicherheiten zu den überregionalen Effekten an den Nebenflüssen weitergehend zu untersuchen. Die hieraus erwachsenden Schlussfolgerungen können weitere wichtige Empfehlungen zur Präzisierung der Auswahl- und Priorisierungskriterien (Kap. 5.3) der Maßnahmen und somit auch Hinweise für einen effizienten Einsatz der Ressourcen des NHWSP geben.

Lassen sich Veränderungen in den grundsätzlichen Rahmenbedingungen in einem Flussgebiet feststellen (staatenübergreifende Auswirkungen / Bestrebungen im Hochwasserschutz; erhöhte Wahrscheinlichkeiten und schwerwiegender Ausmaße von extremen Hochwassern, bspw. in Folge des Klimawandels; modifizierte sozioökonomische Prioritätssetzungen), dann ist als wichtiger Beitrag zu einer integrierten Sichtweise (Kap. 6.3) ebenfalls eine Fortschreibung der hydraulisch-hydrologisch Nachweisrechnungen im Sinne der bisher angestellten Untersuchungen zu empfehlen.

Mit Blick auf die Optimierung des Einsatzes von Ressourcen sollte bei der Fortschreibung der Nachweisrechnungen eine enge Abstimmung mit weiteren, vergleichbar gelagerten Vorhaben in den Flussgebieten (bspw. Programm Rhein 2040 der IKSР; IKSР 2020, Arbeiten zur „Erfolgskontrolle“ im Rahmen der Berichterstattung zur EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie) stattfinden.

6.2 Hochwasserrisiko

Die Maßnahmen des NHWSP bilden einen wichtigen Baustein im Rahmen der durch die Länder umgesetzten EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie. Diese stellt das Hochwasserrisiko in den Vordergrund und berücksichtigt somit sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen als auch die möglichen nachteiligen Folgen auf die vier Schutzgüter menschliches Leben und Gesundheit, Umwelt, wirtschaftliche Tätigkeiten und Kulturerbe. Bei der Identifizierung und Priorisierung von Maßnahmen folgt das NHWSP bereits diesem Ansatz, indem die Wirksamkeit von Maßnahmen über die Anzahl an bevorteilten Einwohnern abgeschätzt wird und positive Effekte (Synergien) auf weitere Handlungsfelder in die Bewertung mit einbezogen werden (Kap. 6.3). Bei der Aktualisierung der Hochwasserrisikomanagementpläne für die einzelnen Flussgebiete wurden die Maßnahmen des NHWSP in diese Pläne integriert, sofern sie nicht bereits in den Plänen von 2015 enthalten waren.

Zur Quantifizierung der Maßnahmenwirkung im NHWSP wurde sowohl in den Ad-hoc-Untersuchungen (BfG 2014a, BfG 2016) als auch im Rahmen des FuE-Vorhabens ein rein hydraulisch-hydrologischer Ansatz verfolgt, der zwar Aussagen zu Wirkungen auf den Wellenablauf und die Scheitelwasserstände erlaubt, zur Veränderung des Hochwasserrisikos jedoch keine Aussagen treffen kann. Diese können allerdings in vielfältiger Art und Weise hilfreich und notwendig sein, u. a. um Ressourceneinsätze für NHWSP-Maßnahmen zu begründen oder um den wirtschaftlichen Gesamtnutzen des NHWSP besser zu quantifizieren und somit im Spannungsfeld gegensätzlicher gesellschaftlicher Interessen zu rechtfertigen. Beispiele für solche auf Mesoskala bzw. Makroskala durchführbaren Betrachtungen finden sich in DKKV (2015; exemplarische Analyse der Schadensminderung für die Stadt Wittenberge bei verschiedenen Szenarien der Havelpolderflutung beim Hochwasser 2013) oder in IKSР (2016).

6.3 Synergien und integrierte Betrachtungsweise

Neben dem primären Ziel des präventiven Hochwasserschutzes legt das NHWSP ganz bewusst Wert auf die Nutzung von Synergien (im Sinne von positiven Wechselwirkungen) mit der handlungsfeldübergreifend integrierten Gewässerentwicklung, der Anpassung an den Klimawandel und den Naturschutz und soll somit auch die Auenentwicklung in Deutschland voranbringen. Mit dieser integrierten Sichtweise werden im Hochwasserschutz „Synergiepotentiale“ viel stärker gewichtet als noch vor wenigen Jahren (Buschhüter et al. 2018). „Hierzu müssen diese erkannt und genutzt werden, was bereits bei der Maßnahmenauswahl und -priorisierung zu beachten ist“ (Mehl et al. 2019).

Im Rahmen des derzeit durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) beauftragten FuE-Vorhabens „Synergien des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“ (kurz: FuE-Synergien) sollen die zuvor genannten Synergien gemeinsam mit den Bundesländern sichtbar gemacht sowie die Vorgehensweise zur Identifikation, Umsetzung und schließlich Berücksichtigung bei der weiteren Planung analysiert und weiterentwickelt werden. „Ziel sind praxisnahe Empfehlungen im Hinblick auf Kriterien und Methoden zur Ermittlung und Bewertung von Synergien sowie zur möglichst umfänglichen und gezielten Berücksichtigung bei der Umsetzung des Programms“ (Mehl et al. 2019).

Das noch nicht abgeschlossene FuE-Vorhaben des BfN kann somit die hydrologische-hydraulische Bewertung der raumgebenden Maßnahmen, die durch die BfG im Rahmen des FuE-NHWSP vorgenommen wurde, ergänzen und einen weiteren fachlichen Baustein auf dem mit dem NHWSP angestrebten Weg von einer rein sektoralen hin zu einer integrierten Betrachtung von großräumigen Maßnahmen des Hochwasserschutzes darstellen. Eine gezielte Fortführung dieses Wegs entspräche den wachsenden gesellschaftlichen Ansprüchen, die ein sektoren- und interessenübergreifendes Bewertungssystem als Bestandteil einer integrierten Daseinsvorsorgeplanung in Deutschland erfordern.

7 Quellenverzeichnis

Aquantec (2018): Isar – Einbindung der Retentionswirkung der Maßnahme „Isar2020 – Vorbeugender Hochwasserschutz“ in LARSIM. Ableitung von Volumen-Abfluss-(dV/dQ-)Beziehungen aus hydraulischen Berechnungen für Fließstrecken der Isar, Erläuterungsbericht (unveröffentlicht)

BCE (2009): Erstellung des eindimensionalen Feststofftransportmodells für die Elbe. Dokumentation des hydraulischen Modells. Projektbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Björnsen Beratende Ingenieure, Koblenz (unveröffentlicht)

BCE (2012): Hochwasserrisikomanagementplan Schwarze Elster – hydronumerische Modellierung und Erstellung von Risiko- und Gefahrenkarten. Los 1. Erläuterungsbericht im Auftrag des Landesamts für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg. Björnsen Beratende Ingenieure, Koblenz (unveröffentlicht)

BfG (2006): Modellgestützter Nachweis der Auswirkungen von geplanten Rückhaltemaßnahmen in Sachsen und Sachsen-Anhalt auf Hochwasser der Elbe. BfG-Bericht 1542, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. <http://doi.bafg.de/BfG/2014/BfG-1542.pdf> (28.01.2020)

BfG (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse. BfG-Mitteilungen Nr. 31. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. http://doi.bafg.de/BfG_Mitteilungen_31.2014.pdf (09.05.2019)

BfG (2014a): 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. BfG-Bericht Nr. 1833, Teil 1 vom 17.10.2014. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. <http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1833.pdf> (29.04.2019)

BfG (2016): Ad-hoc-Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms. Teilbericht 2: Exemplarische Ermittlung realitätsnäherer Wirkungen und Wirkungsgrade der gemeldeten gesteuerten Rückhaltungen an Rhein, Elbe und Donau. BfG-Bericht Nr. 1833, Teil 2 vom 04.05.2016. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. <http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1833.pdf> (29.04.2019)

BfG (2017): Zusammenstellung der Datengrundlagen und Modellierungen für die Ermittlung der Maßnahmenwirkungen in den einzelnen Flusseinzugsgebieten sowie Herausarbeitung des weiteren Bedarfs. Abschlussdokumentation zu Arbeitspaket 1 des FuE-Vorhabens im NHWSP. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz (unveröffentlicht)

BfG (2018): WAVOS Elbe – Verbesserung der Hochwasservorhersage. BfG-Bericht Nr. 1962. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. <http://doi.bafg.de/BfG/2018/BfG-1962.pdf> (12.02.2020)

BfG (2020): Maßnahmenliste des NHWSP mit Stand des Jahres 2020. Entnommen aus dem eNHWSP-Portal im „WasserBLicK“ der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. zugriffsgeschützt (25.05.2020)

BMU (2019): Das Nationale Hochwasserschutzprogramm. Homepage des BMU zum NHWSP. www.bmu.de/DL1652 (29.04.2019)

BRH (2019): Bericht des Bundesrechnungshofs an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages nach § 88 Abs. 2 BHO über die Prüfung der Berichterstattung der Bundesregierung zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm.

<https://www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/produkte/beratungsberichte/langfassungen/langfassungen-2019/2019-bericht-berichterstattung-der-bundesregierung-zum-nationalen-hochwasserschutzprogramm-pdf> (26.08.2020)

Brust, K. (2018): Bewertung überregionaler Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen – Entwicklung eines Bewertungskonzeptes im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm. Masterarbeit an der TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (unveröffentlicht)

Buschhüter, E.; van Dillen, A.; Menn, K.; Paas, R. (2018): Das nationale Hochwasserschutzprogramm. In: Natur und Landschaft, 93. Jahrgang, Februar 2018, Heft 2, Bundesamt für Naturschutz über Kohlhammer Verlag, Stuttgart, Seite 50-53

DKKV (2015): Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V., DKKV-Schriftenreihe Nr. 53, Bonn.
https://www.dkkv.org/fileadmin/user_upload/Veroeffentlichungen/Publikationen/DKKV_53_Hochwasser_Juni_2013.pdf (27.08.2020)

FGG Elbe (2018): Beschlüsse der 31. Sitzung des Elberates vom 02.11.2018. Flussgebietsgemeinschaft Elbe, Magdeburg (unveröffentlicht)

Hatz, M.; Duong, D. Q.; Schuh, C. (2021): Modellbasierte Untersuchungen zur Wirkung der raumgebenden Hochwasserschutzmaßnahmen des NHWSP im Flussgebiet des Rheins. Flussgebietsbericht im Rahmen des FuE-Vorhabens „Analyse der Wirkungen von Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“. BfG-Bericht Nr. 2047. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. DOI: 10.5675/BfG-2047.
<http://doi.bafg.de/BfG/2021/BfG-2047.pdf>

Hatz, M.; Reeps, T. (2021): Modellbasierte Untersuchungen zur Wirkung der raumgebenden Hochwasserschutzmaßnahmen des NHWSP im Flussgebiet der Elbe. Flussgebietsbericht im Rahmen des FuE-Vorhabens „Analyse der Wirkungen von Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“. BfG-Bericht Nr. 2048. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. DOI: 10.5675/BfG-2048.
<http://doi.bafg.de/BfG/2021/BfG-2048.pdf>

HKV Hydrokontor (2009): Erstellung von SOBEK-Modellen für Werra, Fulda und Oberweser. Projektbericht P-08.007. Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. HKV Hydrokontor, Aachen (unveröffentlicht)

HKV Hydrokontor (2012): Hochwasserrisikomanagementplan Schwarze Elster – hydronumerische Modellierung der Lose 2, 3 und 4. Projektbericht P-10.009 im Auftrag des Landesamts für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg. HKV Hydrokontor, Aachen (unveröffentlicht)

HKV Hydrokontor (2014): Erstellung eines SOBEK-River Modells für den Rhein von Iffezheim bis Pannerdense Kop als Weiterentwicklung bestehender SOBEK-RE-Modelle. Projektbericht PR 2278.10. Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. HKV Hydrokontor, Aachen (unveröffentlicht)

Hofstätter, M.; Jacobit, J.; Homann, M.; Lexer, A.; Chimani, B.; Philipp, A.; Beck, C.; Ganekind, M. (2015): WETRAX – Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. Großflächige Starkniederschläge im Klimawandel in Mitteleuropa. Projektendbericht. Geographica Augustana 19.
https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_projekte/wetra/endbericht (12.03.2020)

HSK (1978): Schlussbericht der Hochwasserstudienkommission (HSK) für den Rhein: Ergebnisse über die Hochwasser und ihre Entwicklung 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. Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Huber, R. (2018): Retentionspotentialstudie am Inn, Zwischenbericht 2. Technische Universität München, München (unveröffentlicht)

Hydrotec (2014): Aktualisierung des SOBEK-Modells für die Bundeswasserstraße Main. Projekt P1531. Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Hydrotec, Aachen (unveröffentlicht)

Hydrotec (2017): eGovernment-System eNHWSP für das Nationale Hochwasserschutzprogramm. Hydrotec, Aachen. <https://www.hydrotec.de/egovernment-system-enhwp/> (25.12.2019)

Hydrotec (2020): Anpassung/Erweiterung des SOBEK-Modells Donau im Rahmen des FuE-Vorhabens „Analyse der Wirkung von Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogrammes“ (FuE-NHWSP). Projektbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Hydrotec, Aachen (unveröffentlicht)

Hydrotec (2020): Aufbau eines Delft3D-Modells für die Weser zwischen Hannoversch Münden und Bremen-Hemelingen. Projektbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Hydrotec, Aachen (in Vorbereitung)

IKSR (2006): Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein infolge Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser bis 2005. IKSR-Bericht Nr. 153 der Expertengruppe HVal. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz.

https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0153.pdf (09.05.2019)

IKSR (2012): Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein. IKSR-Bericht Nr. 199 der Expertengruppe HVal. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz.

https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0199.pdf (29.04.2019)

IKSR (2015): Abschätzung der Wahrscheinlichkeitsänderung durch die hochwasserreduzierenden Maßnahmen entlang des Rheins. IKSR-Bericht Nr. 229. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz.

https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0229.pdf (25.12.2019)

IKSR (2016): Instrument und Methode zum Nachweis der Änderung bzw. Reduzierung des Hochwasserrisikos. IKSR-Bericht Nr. 237 der Expertengruppe HIRI. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz.

https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0237.pdf (27.08.2020)

IKSR (2020): Programm „Rhein 2040“ – der Rhein und sein Einzugsgebiet: nachhaltig bewirtschaftet und klimaresilient. 16. Rheinministerkonferenz am 13.02.2020 in Amsterdam. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz.

https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0237.pdf (27.05.2020)

LAWA (2014): NHWSP Liste prioritärer Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz (UMK).

https://www.lawa.de/documents/nhwsp_liste_massnahmen_1552299278.pdf (13.7.2020)

LAWA (2014a): 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. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz (UMK), beschlossen auf der UMK am 24.10.2014 in Heidelberg.

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/hochwasserschutzprogramm_bericht_bf.pdf (29.04.2019)

LAWA (2014b): Beitrag zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm – Eine flussgebietsbezogene Überprüfung und eventuelle Weiterentwicklung der Bemessungsgrundlagen. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz (UMK).

https://www.lawa.de/documents/00_beitrag_nationales_hochwasserschutzprogramm_flussgebietsbezogene_ueberpruefung_bemessungsgrundlage_84a_1552299200.pdf (26.08.2020)

- LAWA (2014c): Handlungsempfehlungen zur weiteren Verbesserung von Grundlagen und Qualität der Hochwasservorhersage an den deutschen Binnengewässern. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz (UMK).
https://www.lawa.de/documents/00_handlungsempfehlungen_verbesserung_grundlagen_qualitaet_hochwasservorhersage_binnengewaesser_1552299220.pdf (26.08.2020)
- LAWA (2015): Umlaufverfahren 02/2015 zur Konkretisierung der Kriterien für 2016 zur Priorisierung der Maßnahmen des NHWSP. TOP 3 der LAWA-Sondersitzung am 14.01.2015. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz (UMK) (unveröffentlicht)
- LEG (2019): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. LARSIM-Entwicklergemeinschaft (LEG), Hochwasserzentralen LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG, BAFU.
<http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf> (20.01.2020)
- LfU BY (2019): AP 2020plus Flutpolder Donau. Einsatz und Steuerung der Flutpolder. Bewirtschaftungsstrategie. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg (unveröffentlicht)
- LHW (2019): Mitteilung des Landesbetriebs für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt an die Bundesanstalt für Gewässerkunde im Rahmen des Projekts „Homogenisierung der langen HQ-Reihen an der Elbe (1890-2013)“ im Herbst 2019
- LUBW; LfU RP (2018): Syn1D – Theorie des hydrodynamischen Rechenkerns. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe; Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Mainz. <https://www.hvz.baden-wuerttemberg.de/pdf/S1D-Dokumentation.pdf> (20.01.2020)
- Mehl, D.; Iwanowski, J.; Hausmann, B. (2019): Synergien des Nationalen Hochwasserschutzprogramms mit naturschutzfachlichen, gewässerökologischen und klimapolitischen Zielsetzungen. In: Wasser und Abfall, 07-08/2019, Springer Professional, Wiesbaden, Seite 59-61. https://www.institut-biota.de/publikationen/veroeffentlichungen/detail/jahr-2019.html?file=files/medien/publikationen/2019/201908_NHWSP.pdf (27.08.2020)
- Promny, M. (2019): Das NHWSP-Projekt „Optimierung der Nutzung der Havelpolder“ – Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Veranstaltung: Vorstellung der Ergebnisse des NHWSP-Projekts Optimierung der Nutzung der Havelpolder, Haus der Flüsse, 23.10.2019, Havelberg.
https://havelpolder.de/sixcms/media.php/land_bb_test_02.a.189.de/02_Vortrag_BfG_Promny_Havelpolderprojekt.pdf (12.02.2020)
- RiQuest (2017): Optimierung und Anpassung des SOBEK-Modells Niederrhein im Rahmen des FuE-Vorhabens „Analyse der Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“ (NHWSP). Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. RiQuest, HKV Hydrokontor, Nijkerkerveen (NL) (unveröffentlicht)
- Scholz und Lewis Planungsgesellschaft (2014): Oderprogramm, Teilobjekt 17. Polder Neuzeller Niederung. Modellierung Polderwirksamkeit. Projektbericht im Auftrag des Landesamts für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Scholz und Lewis Planungsgesellschaft, Dresden (unveröffentlicht)
- Schuh, C.; Schmid, M. (2018): Einsatz von Modellsystemen im Donaugebiet – Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm. In: BfG (2018): Großräumige Abflussmodellierung – 50 Jahre hydraulische Modellierung in der BfG Kolloquium am 12./13. Juni 2018 in Koblenz – Veranstaltungen 3/2018. Seite 92-100. http://doi.bafg.de/BfG/2018/Veranst3_2018.pdf (29.04.2019)
- Schuh, C.; Schmid, M.; Giehl, S.; Hatz, M. (2021): Modellbasierte Untersuchungen zur Wirkung der raumgebenden Hochwasserschutzmaßnahmen des NHWSP im Flussgebiet der Donau. Flussgebietsbericht im Rahmen des FuE-Vorhabens „Analyse der Wirkungen von Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms“. BfG-Bericht Nr. 2049. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. DOI: 10.5675/BfG-2049. <http://doi.bafg.de/BfG/2021/BfG-2049.pdf>

SK (2020): Nachweis der Wirksamkeit der Hochwasserrückhaltemaßnahmen am Oberrhein zwischen Basel und Worms. Bericht, Ständige Kommission – Unterarbeitsgruppe Wirksamkeitsnachweis. <https://www.hvz.baden-wuerttemberg.de/pdf/WN-2020-Bericht-SK.pdf> (26.11.2020)

Tracetebel Hydroprojekt (2020): Generierung von Ganglinien für die weitergehende Analyse der Wirkung der gemeldeten Maßnahmen Thüringens im Nationalen Hochwasserschutzprogramm. Endbericht im Auftrag des Thüringer Landesamts für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. Tracetebel Hydroprojekt GmbH, Weimar (unveröffentlicht)

UMK (2013): Beschlüsse der Sonderumweltministerkonferenz Hochwasser, 2. September 2013, Berlin.
https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/03-09-13_sonderumk_2_1518084332.pdf (20.07.2020)

A Im NHWSP in den Flussgebieten gemeldete DRV- und HWR-Maßnahmen

A.1 DRV-Maßnahmen

Tabelle A - 1: Gemeldete DRV-Maßnahmen im Flussgebiet Donau

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	Im NHWSP seit	Land	Gewässer	Fläche (ha)	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
a	DRV Donau Straubing – Isarmündung	JA	3	2015	BY	Donau	164		x	
b	DRV Donau Isarmündung – Vilshofen	JA	7	2015	BY	Donau	445			x
c	DRV Schwäbische Donau	JA	1	2017	BY	Donau	660			x
d	DRV Lech mit Gewässerentwicklung	JA	1	2015	BY	Lech	188			x
e	Mittlere Isar 2020	JA	2	2015	BY	Isar	580			x
f	Salzach	JA	2	2015	BY	Salzach	130			x

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle A - 2: Gemeldete DRV-Maßnahmen im Flussgebiet Weser

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	im NHWSP seit	Land	Gewässer	Fläche (ha)	Ums. bis 2021	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
a	Verbundmaßnahme Werra-Unterlauf	JA	2	2016	HE	Werra	140			x
b	Maßnahme Eder-Oberlauf	NEIN		2016	HE	Eder	147			x
c	Verbundmaßnahme Eder-Unterlauf	JA	2	2016	HE	Eder	244		x	

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle A - 3: Gemeldete DRV-Maßnahmen im Flussgebiet Rhein

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	im NHWSP seit	Land	Gewässer	Fläche (ha)	Ums. bis 2021	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
a	IRP Rückhalteraum Weil-Breisach	NEIN		2015	BW	Rhein	596			x
b	IRP Rückhalteraum Elisabethenwörth	NEIN		2015	BW	Rhein	410			x
c	DRV Bechtheimer Kanal	NEIN		2015	RP	Rhein	190			x
d	Verbundmaßnahme Monheim-Mündelheim-Orsoy	NEIN		2015	NW	Rhein	480		x	
e	DRV Hattersheim / Flörsheim	NEIN		2015	HE	Main	125		x	
f	Verbundmaßnahme Kinzig	JA	6	2015	HE	Kinzig (HE)	1289			x
g	Deichrückverlegungen Acher-Rench	JA	1	2015	BW	Acher/Rench	260		x	
h	Deichrückverlegungen Elz/Dreisam	JA	3	2015	BW	Elz/Dreisam	147			x
i	Verbundmaßnahme Gersprenz	JA	3	2015	HE	Gersprenz	131			x
k	Deichrückverlegungen Kinzig	JA	4	2015	BW	Kinzig (BW)	180			x
l	Verbundmaßnahme Lahn-Oberlauf	JA	3	2015	HE	Lahn	216		x	
m	Verbundmaßnahme Lahn-Mittellauf	JA	6	2015	HE	Lahn	226		x	
n	DRV Untere Nahe	JA	2	2015	RP	Nahe	130		x	
o	Verbundmaßnahme Nidda	JA	7	2015	HE	Nidda	243		x	
p	Verbundmaßnahme Schwarzbach	JA	5	2015	HE	Schwarzbach	264		x	

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle A - 4: Gemeldete DRV-Maßnahmen im Flussgebiet Elbe

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	im NHWSP seit	Land	Gewässer	Fläche (ha)	Ums. bis 2021	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
a	Deichrückverlegung bei Wittenberg	JA	2	2015	ST	Elbe	514		x	
b	DRV Elbedeiche Landkreis Stendal	JA	3	2015	ST	Elbe	296		x	
c	Verbundmaßnahme – „Wiedergewinnung von Retentionsflächen an der unteren Mittelelbe“	JA	4	2020	NI	Elbe	574		x	
d	Maßnahmen zur Wiedergewinnung von Retentionsraum und zur Beseitigung von Engstellen an der nds. unteren Mittelelbe	NEIN		2015	NI	Elbe	140		x	
e	DRV Bennewitz - Püchau	NEIN		2015	SN	Vereinigte Mulde	615			x
f	Deichrückverlegung Mulde	JA	3	2015	ST	Vereinigte Mulde	205		x	
g	Deichrückverlegungen an der Schwarzen Elster in BB und ST im Verbund	JA	4	2015	ST	Schwarze Elster	14827			x
h	Retentionsraum Unstrutauen	NEIN		2015	TH	Unstrut	7000			x
i	Deichrückverlegung nördliche Geraaue	NEIN		2015	TH	Gera	840			x

Quelle: Daten: BfG 2020

A.2 HWR-Maßnahmen

Tabelle A - 5: Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Weser

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	im NHWSP seit	Land	Gewässer	Volumen (Mio. m³)	Ums. bis 2021	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
1	HRB Bad Salzuflen/Werre	NEIN		2015	NW	Werre	2,1			x

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle A - 6: Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Elbe

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	im NHWSP seit	Land	Gewässer	Volumen (Mio. m³)	Ums. bis 2021	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
1	Polder Außig	NEIN		2015	SN	Elbe	11,0			x
2	Polder Ammelgossowitz	NEIN		2015	SN	Elbe	11,1			x
3	Polder Döbeltitz	NEIN		2015	SN	Elbe	12,1			x
4	Polder Dautzschen	NEIN		2015	SN	Elbe	54,8			x
5	Polder Polbitz	NEIN		2015	SN	Elbe	4,4			x
6	Polder Dommitzschen	NEIN		2015	SN	Elbe	9,0			x
7	Polder Axien / Mauken	NEIN		2015	ST	Elbe	52,0		x	
8	Polder Tangermünde	NEIN		2016	ST	Elbe	70,0		x	
9	Flutungspolder Karthaneniederung	NEIN		2015	BB	Elbe	47,0			x
10	Flutungspolder Lenzer Wische	NEIN		2015	BB	Elbe	42,0			x
11	Nutzung Tagebaurestseen Schwarze Elster für den Hochwasserrückhalt	NEIN		2015	BB	Schwarze Elster	25,0			x
12	Optimierung der Nutzung Havelpolder und des Stauregimes Havel / Spree	JA	2	2015	BB	Havel	338,3	x		
13	HRB Mulda einschl. Überleitungsstollen	NEIN		2015	SN	Freiberger Mulde	5,4			x
14	HRB Oberbobritzsch	NEIN		2015	SN	Bobritzsch	4,9			x
15	Polder Löbnitz	NEIN		2015	SN	Vereinigte Mulde	15,0			x
16	Hochwasserrückhaltebecken Selke bei Straßberg	NEIN		2015	ST	Selke	4,5		x	
17	Hochwasserschutz untere Selke	NEIN		2015	ST	Selke	2,3		x	
18	Polder Elster-Luppe-Aue	NEIN		2016	ST	Weisse Elster	12,3		x	
19	Polder Röpzig-Beuchlitz- Passendorf	NEIN		2016	ST	Saale	14,4		x	
20	Polder linkes Muldevorland (Seelhausener See im Verbund mit Großem Goitzschesee)	NEIN		2019	ST	Vereinigte Mulde	45,0		x	

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle A - 7: Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Rhein

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	im NHWSP seit	Land	Gewässer	Volumen (Mio. m³)	Ums. bis 2021	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
1	IRP Rückhalteraum Kulturwehr Breisach	NEIN		2015	BW	Rhein	9,3		x	
2	IRP Rückhalteraum Breisach/Burkheim	NEIN		2015	BW	Rhein	6,5		x	
3	IRP Rückhalteraum Wyhl/Weisweil	NEIN		2015	BW	Rhein	7,7		x	
4	IRP Rückhalteraum Elzmündung	NEIN		2015	BW	Rhein	5,3	x		
5	IRP Rückhalteraum Ichenheim/Meissenheim/Ottenheim	NEIN		2015	BW	Rhein	5,8			x
6	IRP Rückhalteraum Freistett/Rheinau/Kehl	NEIN		2015	BW	Rhein	9,0			x
7	IRP Rückhalteraum Bellenkopf/Rappenwört	NEIN		2015	BW	Rhein	14,0			x
8	Rückhalteraum Waldsee/Altrip/Neuhofen	NEIN		2015	RP	Rhein	9,0		x	
9	Reserveraum Eich-Guntersblum	JA	5	2015	RP	Rhein	29,0			x
10	Reserveraum gegen Extremhochwasser Hördt	JA	4	2015	RP	Rhein	32,0			x
11	RHR Worriinger Bruch	NEIN		2015	NW	Rhein	29,4		x	
12	RHR Orsoy-Land	NEIN		2015	NW	Rhein	18,1		x	
13	RHR Lohrwardt	NEIN		2015	NW	Rhein	26,3		x	
14	Flutpolder Bergheinfeld	NEIN		2015	BY	Main	5,0		x	
15	Umsetzung erweitertes Rückhaltekonzept bay. Mainneinzugsgebiet	NEIN		2015	BY	Main	20,0			x
16	Hochwasserschutz Roter Main	JA	3	2017	BY	Roter Main	3,0			x
17	Verbundmaßnahme Kinzig	JA	7	2015	HE	Kinzig (HE)	3,0	x		

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle A - 8: Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Donau

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	im NHWSP seit	Land	Gewässer	Volumen (Mio. m³)	Ums. bis 2021	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
1	Leipheim	NEIN		2015	BY	Donau	10,0			x
2	Helmeringen	NEIN		2017	BY	Donau	6,5			x
3	Neugeschüttwörth	NEIN		2016	BY	Donau	23,0			x
4	Bertoldsheim	NEIN		2015	BY	Donau	18,0			x
5	Riedensheim	NEIN		2015	BY	Donau	8,1		x	
6	Großmehring	NEIN		2015	BY	Donau	12,8			x
7	Katzau	NEIN		2015	BY	Donau	6,6			x
8	Eltheim	NEIN		2015	BY	Donau	16,0			x
9	Wörthhof	NEIN		2015	BY	Donau	16,0			x
10	Öberauer Schleife	NEIN		2015	BY	Donau	14,0		x	
11	RHR Steinkirchen	NEIN		2018	BY	Donau	21,1		x	
12	Feldkirchen	NEIN		2015	BY	Inn	14,0		x	
13	Wasserburg	NEIN		2015	BY	Inn	2,0			x
14	Feldolling	NEIN		2015	BY	Mangfall	6,6		x	
15	HWRB Jachen/Walchensee	NEIN		2015	BY	Jachen	40,0			x
16	HWS Günztal - 5 HWRB (Günz)	NEIN		2015	BY	Günz	8,0		x	
17	Hochwasserausgleich Tegernsee	NEIN		2017	BY	Tegernsee	2,5		x	

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle A - 9: Gemeldete HWR-Maßnahmen im Flussgebiet Oder

Ifd. Nr.	Name	Verbund- maß. (JA/NEIN)	Teil- maß.	im NHWSP seit	Land	Gewässer	Volumen (Mio. m³)	Ums. bis 2021	Ums. bis 2027	Ums. bis 2027+
1	Flutungspolder Neuzeller Niederung	nein		2015	BB	Oder	43,0			x
2	Flutungspolder Ziltendorfer Niederung	nein		2015	BB	Oder	70,0			x

Quelle: Daten: BfG 2020

B In den Flussgebieten Donau, Elbe und Rhein ausgewählte Hochwasserereignisse

Für die folgenden Tabellen gilt: die statistische Einordnung des Scheitelabflusses mit der höchsten Jährlichkeit am Hauptstrom (inkl. Angabe der Pegel) erfolgt nach Hatz et al. 2021 (Tabelle B-1), Schuh et. al 2021 (Tabelle B-2) und Hatz & Reeps 2021 (Tabelle B-3). Eine qualitative Beschreibung zur Begründung der Auswahl im FuE-NHWSP findet sich jeweils in der letzten Tabellenspalte.

Tabelle B - 1: Ausgewählte HW-Ereignisse im Flussgebiet Rhein

Hochwasser Monat / Jahr	Modell-hochwasser (JA/NEIN)	Maximale Jährlichkeit Hauptstrom	Pegel mit maximaler Jährlichkeit	Ereignisschwerpunkte, Besonderheiten (qualitative Beschreibung; Details siehe Flussgebietsberichte)
03 / 1988	JA	50	Kaub	große Bedeutung v.a. an Ober- und Mittelrhein; Überlagerung der Scheitel aus Schwarzwald, Neckar und Main; <i>Einsatz von Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein</i>
01 / 1995	JA	50 - 100	Emmerich	große Bedeutung v.a. am Niederrhein nach Zufluss von Mosel und Sieg; <i>zweithöchstes im 20. Jhd. am Niederrhein gemessenes Ereignis</i>
05 / 1999	NEIN	> 200	Basel	am südlichen Oberrhein von großer Bedeutung, bereits am Mittelrhein nur noch im Bereich eines mittleren Hochwassers; <i>Einsatz von Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein</i>
01 / 2003	JA	10 - 20	Köln, Emmerich	ähnlicher Verlauf wie Hochwasser 1995 (allerdings bei niedrigerer Jährlichkeit) mit hohen Abflüssen in zahlreichen Nebenflüssen (Main, Nahe, Lahn, Mosel)
01 / 2011	NEIN	5 - 10	Kaub	am gesamten Rhein nur mit mittlerer Bedeutung, aber <i>erstmaliger Einsatz des Polders Ingelheim am Mittelrhein</i>
05 / 2013	NEIN	10 - 20	Maxau, Worms	am Oberrhein höher als 1988/1995, aber niedriger als 1999; unterhalb der Moselmündung im Bereich eines mittleren Hochwassers; <i>Einsatz von Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein</i>

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle B - 2: Ausgewählte HW-Ereignisse im Flussgebiet Donau

Hochwasser Monat / Jahr	Modell-hochwasser (JA/NEIN)	Maximale Jährlichkeit Hauptstrom	Pegel mit maximaler Jährlichkeit	Ereignisschwerpunkte, Besonderheiten (qualitative Beschreibung; Details siehe Flussgebietsberichte)
05 / 1999	JA	200	Ingolstadt	stärkste Betroffenheit zw. Lech- und Isar-mündung; ober- und unterstrom mittlere Bedeutung; <i>Deichbruch in Neustadt (Donau)</i>
08 / 2002	JA	20 - 50	Achleiten	große Bedeutung v.a. im Inngebiet und an der Donau unterhalb Passau
08 / 2005	JA	20 - 50	Ingolstadt, Kelheim	ähnlicher Verlauf wie 1999, aber niedrigere Abflüsse an der Donau u. a. wegen größerer Hochwasserretention u. verbesserter Hochwasserschutzfunktion d. Forggensees (Lech)
01 / 2011	NEIN	10 - 20	Pfelling, Hofkirchen	überwiegend geringe (obere Donau) bis mittlere Bedeutung (unterhalb Regensburg)
06 / 2013	JA	200 - 500	Achleiten	sich kontinuierlich nach unterstrom verschärfendes Ereignis mit HQ ₁₀₀ im Bereich der Isarmündung (<i>Deichbrüche</i>) und sehr großen Abflüssen (>> HQ ₁₀₀) unterhalb Innmündung

Quelle: Daten: BfG 2020

Tabelle B - 3: Ausgewählte HW-Ereignisse im Flussgebiet Elbe

Hochwasser Monat / Jahr	Modell-hochwasser (JA/NEIN)	Maximale Jährlichkeit Hauptstrom	Pegel mit maximaler Jährlichkeit	Ereignisschwerpunkte, Besonderheiten (qualitative Beschreibung; Details siehe Flussgebietsberichte)
04 / 1994	NEIN	2	Wittenberge, Neu-Darchau	an der Elbe nur von geringer Bedeutung; bis dato größtes Hochwasser an der Saale
08 / 2002	JA	100 - 200	Dresden, Torgau, Wittenberg	große Bedeutung an oberer Elbe und oberer Mittelelbe; zahlreiche Deichbrüche in SN und ST sowie Einsatz der Havelpolder reduzieren Scheitel an unterer Mittelelbe deutlich
03-04 / 2006	JA	20	Wittenberge, Neu-Darchau	mittlere Bedeutung an der oberen (Mittel-) Elbe; vergleichbare Wasserstände wie 2002 an der unteren Mittelelbe
09-10 / 2010	NEIN	2 - 5	Aken	an der Elbe nur von geringer Bedeutung; lang anhaltendes und bedeutendes Hochwasser an der Schwarzen Elster
2011	NEIN	20	Wittenberge, Neu-Darchau	geringe/mittlere Bedeutung an der Elbe; hohe Abflüsse in Nebenflüssen (Schwarze Elster, Mulde, Saale); an der unteren Mittelelbe höhere Wasserstände als 2002 und 2006
06 / 2013	06	100 - 200	Wittenberg bis Tangermünde	große Bedeutung im gesamten Elbegebiet; Deichbrüche Kl. Rosenberg (Saale, ST) & Fischbeck (Elbe, ST), Einsatz der Havelpolder

Quelle: Daten: BfG 2020