

BfG-1938

Bericht

Homogenisierung der HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren

Erstellt im Rahmen des Kooperationsvertrags zwischen der Flussgebietsgemeinschaft Elbe und der Bundesanstalt für Gewässerkunde vom 14.05.2013

Autoren: Dipl.-Geoökol. Marcus Hatz Dipl.-Met. Norbert Busch Dipl.-Geograph Jörg-Uwe Belz Dipl.-Ing. Maria Larina-Pooth alle Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Seitenzahl: 189 DOI: 10.5675/BfG-1938

Koblenz, den 29.01.2018

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS III		
A	BBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
Т	ABELLENVERZEICHNIS	XIII
A	BKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XV
1	EINLEITUNG UND VERANLASSUNG	1
2	DIE HYDROLOGISCHEN VERHÄLTNISSE IM EINZUGSGEBIET DER ELH	3E7
	2.1 DER TSCHECHISCHE TEIL DES EINZUGSGEBIETS DER ELBE	7
	2.2 DER DEUTSCHE TEIL DES EINZUGSGEBIETS DER ELBE	13
	2.3 GENESEN CHARAKTERISTISCHER HOCHWASSER IM ELBE-EINZUGSGEBIET	18
	2.3.1 Das Hochwasser vom August 2002	19
	2.3.2 Das Hochwasser vom März/April 2006	21
	2.3.3 Das Hochwasser vom Januar 2011	22
	2.3.4 Das Hochwasser vom Juni 2013	23
	2.4 TALSPERREN IM EINZUGSGEBIET DER ELBE	
	2.4.1 Talsperren in Tschechien (Moldau, Eger, Elbe)	26
	2.4.2 Steuerung der tschechtschen Talsperren	
_	2.4.5 Tuisperren in Thuringen (Suale)	
3	ERKENNTNISSE ZUR INHOMOGENITAT VON HQ-REIHEN IN DEUTSCH	LAND
U	IND ISCHECHIEN	41
	3.1 HOMOGENISIERUNG VON HQ-REIHEN IM RHEINGEBIET	41
	3.2 HOMOGENISIERUNG VON HQ-REIHEN IM TSCHECHISCHEN ELBEGEBIET	44
	3.3 ERSTELLUNG DER HQ-REIHEN IM DEUTSCHEN ELBEGEBIET	45
4	VORGEHENSWEISE UND ARBEITSSCHRITTE	53
5	WAHL VON 30 CHARAKTERISTISCHEN HOCHWASSERN	59
6	AUSWAHL DER FÜR DIE MODELLIERUNG UND HOMOGENISIERUNG	
N	IABGEBLICHEN TALSPERREN	63
	6.1 KRITERIEN ZUR WAHL DER MAßGEBLICHEN TALSPERREN IN TSCHECHIEN	63
	6.2 MAßgebliche Talsperren für die Modellierung	65
7	EINGESETZTE MODELLWERKZEUGE	69
	7.1 EINGESETZTE MODELLE FÜR DEN TSCHECHISCHEN TEIL DES ELBEGEBIETS	69
	7.1.1 Modellsystem für den durch Talsperren unbeeinflussten Zustand "1890"	69
	7.1.2 Modellsystem für die durch Talsperren beeinflussten Zustände	72

```
Bericht
BfG-1938
```

7.1.3 Wirkung von Talsperren und Ermittlung von Modellrandbedingungen	74
7.2 EINGESETZTE MODELLE FÜR DEN DEUTSCHEN TEIL DES ELBEGEBIETS	75
7.2.1 Berechnung der Wirkung der Saalekaskade am Pegel Kaulsdorf	76
7.2.2 WTM-Modell der Saale zwischen Kaulsdorf und Halle	78
7.2.3 SOBEK-Modell der Elbe und wichtiger Nebenflüsse	82
8 GENERIERUNG UND AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN	85
8.1 DATENRECHERCHE UND -AUFBEREITUNG IN TSCHECHIEN	85
8.1.1 Wasserstands- und Abflussganglinien	86
8.1.2 Talsperren: Wasserstände, Zu- und Abflüsse	87
8.2 DATENRECHERCHE UND -AUFBEREITUNG IN DEUTSCHLAND	89
8.2.1 Digitalisierung von Pegeldaten der Elbe und ihrer Nebenflüsse	90
8.2.2 Plausibilisierung der vorliegenden Messdatengrundlage	92
8.2.3 Generierung von stündlichen Datensätzen	96
8.2.4 Daten für die Talsperren der Saalekaskade	99
9 WEITERE ANTHROPOGENE MAßNAHMEN IM DEUTSCHEN ELBEGEBIET	
UND IHRE AUSWIRKUNGEN AUF DIE ABFLUSSVERHÄLTNISSE	101
9.1 Erkenntnisse zum Einfluss veränderter Vorlandtopographien und	
VEGETATIONSSTRUKTUREN AN DER ELBE AUF HOCHWASSER	102
9.2 Verlust und Rückgewinnung von Überschwemmungsgebieten an der Elbe	
SEIT 1890	105
9.2.1 Digitalisierung und Vektorisierung der Karten des Elbstromwerks	106
9.2.2 Modellgestützte Wirkungsabschätzungen zum Verlust von Überschwemmungsgebiete	n
seit 1890 auf Elbehochwasser	112
10 MODELLBERECHNUNGEN UND IHRE AUSWERTUNG	121
10.1 IST-ZUSTAND / VERGLEICH VON MODELL- UND MESSDATEN	122
10.1.1 WTM-Modell der Saale zwischen Kaulsdorf und Halle-Trotha	123
10.1.2 Tschechisches Modellsystem oberhalb von Ustí n. L	124
10.1.3 SOBEK-Modell der Elbe (ab Ústí n. L) und Saale (ab Halle-Trotha)	126
10.2 ZUSTAND 2013 / VERGLEICH VON IST-ZUSTAND UND ZUSTAND 2013	129
10.3 ZUSTAND 1890 / VERGLEICH VON ZUSTAND 2013 UND ZUSTAND 1890	131
10.4 Ergebnisse der Simulationsberechnungen für Zwischenzustände	134
10.4.1 Zustand mit den Saale-Talsperren	134
10.4.2 Zustand mit den Saale-Talsperren und der Talsperre Lipno	134
10.4.3 Zustand mit den Saale-Talsperren und den Talsperren Lipno und Orlik	136
11 ERMITTLUNG VON TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN ZUR	
ZUSTANDSBEZOGENEN UMRECHNUNG VON HQ-WERTEN	137
11.1 GRUNDSÄTZLICHES VORGEHEN ZUR ABLEITUNG DER ZUSTANDSBEZOGENEN	
TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN FÜR ELBEPEGEL	137
11.2 Merkmale der zustandsbezogenen Transformationsfunktionen	141
11.2.1 Art der Regressionsbeziehung bzw. Transformationsfunktion	141
11.2.2 Differenzierung der Transformationsfunktionen	142

11.2.3 Bedeutung der Hochwasser 2002 und 2013 für die Ermittlung der	
Transformationsfunktionen	145
11.2.4 Unterscheidung zwischen "Ist-Zustand" und Zustand "2013"	146
11.2.5 Zusammenfassung	146
11.3 PLAUSIBILISIERUNG DER TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN	147
12 EXTREMWERTSTATISTIK FÜR DEUTSCHE ELBEPEGEL AUF BASIS	
INHOMOGENER UND HOMOGENISIERTER HQ-REIHEN (1890-2013)	153
12.1 Ausgangsdaten und ihre Homogenitätsprüfung	153
12.2 Extremwertanalyse	155
12.2.1 Verwendete Methodik	155
12.2.2 Methodische Modifikation im Vergleich zu früheren Arbeiten	159
12.3 ERGEBNISSE DER HOCHWASSERSTATISTISCHEN ANALYSE	161
12.4 Ergebnisanalyse und Bewertung	
12.5 Methodenkritik	169
12.6 Schlussfolgerungen	172
13 PERSPEKTIVEN UND EMPFEHLUNGEN	175
14 ZUSAMMENFASSUNG	179
15 LITERATUR	

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: BERECHNETE STRECKENGEMITTELTE REDUKTIONEN DER SCHEITELWASSERSTÄNDE
AUFGRUND DES TALSPERRENEINSATZES IN TSCHECHIEN UND AN DER SAALE1
Abbildung 1-2: Zeitliche Auswertung der im Zeitraum seit 1939 eingeführten
ABFLUSSKURVEN AM PEGEL DRESDEN
ABBILDUNG 2-1: ENTWICKLUNG DES OBERIRDISCHEN EINZUGSGEBIETS DER ELBE IN TSCHECHIEN7
ABBILDUNG 2-2: DAS EINZUGSGEBIET DER ELBE
ABBILDUNG 2-3: MITTLERE JAHRESABFLUSSGANGLINIEN FÜR DIE PEGEL LOUNY (EGER), CHUCHLE
(MOLDAU), BRANDÝS (ELBE), MĚLNÍK (ELBE) UND ÚSTÍ NAD LABEM (ELBE)9
ABBILDUNG 2-4: JÄHRLICHE HOCHWASSERSCHEITELABFLÜSSE AM PEGEL DĚČÍN10
ABBILDUNG 2-5: ABFLUSSGANGLINIEN DER HOCHWASSER 2002, 2006, 2011 UND 2013 AN DEN
PEGELN PRAG-CHUCHLE (MOLDAU) UND ÚSTÍ N. L. (ELBE)11
Abbildung 2-6: Entwicklung des oberirdischen Einzugsgebiets der Elbe unterhalb der
TSCHECHISCH-DEUTSCHEN GRENZE
ABBILDUNG 2-7: MITTLERE JAHRESABFLUSSGANGLINIEN FÜR DRESDEN, BARBY UND WITTENBERGE .15
ABBILDUNG 2-8: JÄHRLICHE HOCHWASSERSCHEITELABFLÜSSE AM PEGEL DRESDEN
ABBILDUNG 2-9: ABFLUSSGANGLINIEN DER HOCHWASSER 1988, 2002, 2006 U. 2013 AN DEN
Pegeln Dresden und Wittenberge16
Abbildung 2-10: Regionale Verteilung der Niederschlagssummen in Tschechien für den
ZEITRAUM ZWISCHEN 6.8.2002 UND 15.8.200219
Abbildung 2-11: Gemessene Abflussganglinien während des Hochwassers im
AUGUST 2002
ABBILDUNG 2-12: GEMESSENE ABFLUSSGANGLINIEN WÄHREND DES HOCHWASSERS IM
MÄRZ/APRIL 2006
ABBILDUNG 2-13: GEMESSENE ABFLUSSGANGLINIEN WÄHREND DES HOCHWASSERS IM
JANUAR 2011
ABBILDUNG 2-14: NIEDERSCHLAGSKARTE FÜR JUNI 2013 FÜR DAS ELBEGEBIET24
ABBILDUNG 2-15: GEMESSENE ABFLUSSGANGLINIEN WÄHREND DES HOCHWASSERS IM JUNI 201325
ABBILDUNG 2-16: GEWÄSSERNETZ DES TSCHECHISCHEN EINZUGSGEBIETS DER ELBE UND LAGE
WICHTIGER PEGEL UND DER IM VORHABEN ANALYSIERTEN TALSPERREN
Abbildung 2-17: Talsperren an der Moldau im Überblick und Angabe des Wasserstands
BEI VOLLSTAU
ABBILDUNG 2-18: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER TALSPERRE MIT UNTERSCHIEDLICHEN
BETRIEBSWASSERSTÄNDEN UND SPEICHERRÄUMEN
ABBILDUNG 2-19: VORENTLEERUNG DER TALSPERRE ORLÍK WÄHREND DES HOCHWASSERS 200633
ABBILDUNG 2-20: STEUERUNG DER TALSPERRE ORLÍK WÄHREND DES HOCHWASSERS 2006
ABBILDUNG 2-21: STEUERUNG DER TALSPERRE ORLÍK WÄHREND DES HOCHWASSERS 2002
ABBILDUNG 2-22: TALSPERREN AN DER SAALE IM ÜBERBLICK
ABBILDUNG 2-23: KONSTRUIERTER GESAMTZUFLUSS ZUR SAALEKASKADE UND ABGABE AM PEGEL
KAULSDORF

ABBILDUNG 3-1: BERECHNETE WIRKUNGEN DES OBERRHEINAUSBAUS BEIM HOCHWASSER
April 1983
ABBILDUNG 3-2: LINEARE REGRESSION SIMULIERTER HQ-WERTE AM PEGEL KÖLN FÜR DIE
ZUSTÄNDE 1977 (OHNE RETENTIONSMABNAHMEN) UND 1998 (MIT RETENTIONSMABNAHMEN)43
ABBILDUNG 3-3: BERECHNETE VERTEILUNGSFUNKTIONEN FÜR ZUSTÄNDE MIT UND OHNE
TALSPERREN AM PEGEL USTÍ NAD LABEM45
ABBILDUNG 3-4: VERGLEICH DER LANGEN HQ-REIHEN AUF BASIS DER OD- UND DER WQE-
SCHEITELABFLÜSSE FÜR DEN PEGEL WITTENBERGE
Abbildung 4-1: Schematische Übersicht über die Abfolge der Arbeitsschritte im
VORLIEGENDEN PROJEKT
ABBILDUNG 5-1: EINORDNUNG DER HQ-WERTE UND DER IN EINEM ERSTEN UND EINEM ZWEITEN
ARBEITSSCHRITT AUSGEWÄHLTEN HOCHWASSER NACH 1968 AM PEGEL WITTENBERGE
Abbildung 6-1: In der Schneedecke gespeicherte Wasseräquivalente für
WINTEREREIGNISSE OBERHALB AUSGEWÄHLTER TALSPERREN
Abbildung 6-2: Ranglistung ausgewählter tschechischer Talsperren anhand des
Volumens ihres gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraums
Abbildung 6-3: Lange inhomogene HO-Reihe (1890-2013) für den Pegel Barby mit
KENNZEICHNUNG DER UNTERSCHIEDLICHEN AUSBAUZUSTÄNDE HINSICHTLICH TALSPERREN66
ABBILDUNG 7-1: LAYOUT DES HYDRODYNAMISCH-NUMERISCHEN 1D-MODELLSYSTEMS FÜR DEN
HISTORISCHEN ZUSTAND VON MOLDAU. EGER UND ELBE IM TSCHECHISCHEN
BEARBEITUNGSGEBIET 70
ABBILDUNG 7-2: VERGLEICH VON GEMESSENER UND MODELLIERTER GANGLINIE IN
MODŘANY/CHUCHLE FÜR DAS HOCHWASSER VOM SEPTEMBER 1890
ABBILDUNG 7-3: LAYOUT DES AQUAL OG-MODELLSYSTEMS FÜR DEN AKTUELLEN ZUSTAND VON
MOLDAUL EGER UND ELBE IM TSCHECHISCHEN BEARBEITUNGSGEBIET
ABBILDUNG 7-4: BERECHNUNG DER VON TALSPERREN UNBEEINELUSSTEN GANGLINIE AM PEGEL
KAULSDORE/SAALE: ERLÄUTERT ANHAND DES HOCHWASSERS VOM APRIL 1994 77
ABBILDUNG 7-5' SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES WTM-MODELLS ZWISCHEN KAULSDORF UND
RUDOI STADT 79
ABBILDING 7-6: LAYOUT DES WTM-MODELLS DER SAALE VON KAULSDORF BIS HALLE-TROTHA 80
ABBILDUNG 7-7: LAYOUT DES SOBEK-MODELLS DER SIELLE VON LISTÉNAD LABEM BIS
GEESTHACHT EINSCHLIERLICH DER IM MODELL BERÜCKSICHTIGTEN NERENELÜSSE 83
ABBILDING 8-1. VORGEHENSWEISE ZUR GENERIERUNG VON STUNDENWERTEN DES AREI USSES AM
PEGEL REANDYS FÜR DAS HOCHWASSER IM JULI 1981 AUF BASIS VON TAGESMITTEI WERTEN 87
ARRILDING 8-2: ANALOGE CUT DIGITAL ISIEDRADE PEGELALIEZEICHNUNGEN AM PEGEL DESDEN
(FI RE) FÜR DAS HOCHWASSER VOM MÄRZ 1993
ABBILDING 8-3: ANALOGE SCHLECHT DIGITALISIEDRADE PEGELALIEZEICHNUNGEN AM PEGEL
NAUMDUDC CROCHERTZ (SAALE) EÜR ENIEN ZEITDALM IM DEZEMBER 1060 02
Appli ding & A. Drüeing der digital en Tageswerte (Hochwasser 1907) am Degel Aken
AUE DI AUGRILITÄT
AUT I LAUSIDILITAT
ADDILJUNG 0-J. DEKEHIGESTELLTE UND FUK DAS I KUJEKT EKZEUGTE ABFLUSSKUKVEN FUK DEN DECET LÖDEN (SCHWADZE ELSTED)
FEUEL LUDEN (OUTWAKZE ELSTEK)
ADDILDUNG O-U. IN IEUKALEKHALIENDE IN IEKPULATIUN VUN TAGESWEKTEN DES ABFLUSSES AM DECEL TANGEDMÜNDE AUE STUNDENWEDTE
regel i angekmunde auf Stundenwekte

ABBILDUNG 9-1: VERLAUF DER GEMESSENEN WASSERSTANDGANGLINIE DES HOCHWASSER 2000
AM PEGEL NEU DARCHAU104
ABBILDUNG 9-2: ELBSTROMKARTE IM BEREICH DER HAVELMÜNDUNG
Abbildung 9-3: Überschwemmungssituation im Bereich Lenzen in den Zuständen 1890
UND 2013
Abbildung 9-4: Durch Baumaßnahmen bedingte Verluste und Rückgewinnungen von
ÜBERSCHWEMMUNGSGEBIETEN AN DER ELBE SEIT 1890111
ABBILDUNG 9-5: HEUTIGE STAUANLAGEN IM BEREICH DER HAVELMÜNDUNGSSTRECKE UND
HAVELPOLDER UNTERHALB VON RATHENOW
Abbildung 9-6: Ergebnisse der modellbasierten Wirkungsabschätzung für 30
AUSGEWÄHLTE HOCHWASSER ZWISCHEN 1970 UND 2013 BEI EINER FIKTIVEN "NATÜRLICHEN"
FLUTUNG DER HAVELNIEDERUNG AM PEGEL WITTENBERGE
Abbildung 9-7: Bedeichte Überschwemmungsgebiete im Zustand 1890 und heute an der
Elbe unterhalb von Lutherstadt Wittenberg116
Abbildung 9-8: Geometrisch abgeleitete Wasserstand-Volumen-Beziehung für das
EINGEDEICHTE GEBIET AN DER ELBE BEI SEEGREHNA UND REHSEN (ELBE-KM 222-235)117
ABBILDUNG 9-9: EXEMPLARISCHE BERECHNUNG DER TALSPERRENWIRKUNG UND
Wirkungsabschätzung weiterer Szenarien für das Hochwasser im April 2006 am
PEGEL WITTENBERGE
Abbildung 10-1: Darstellung der gemessenen Ganglinien am Pegel Kaulsdorf (Saale)
UND EICHICHT (LOQUITZ) SOWIE VERGLEICH ZWISCHEN DEN MESS- UND MODELLWERTEN
DES ABFLUSSES AM PEGEL SAALFELD-REMSCHÜTZ FÜR DAS HOCHWASSER VON JUNI 2013124
ABBILDUNG 10-2: VERGLEICH DER MODELLIERTEN UND GEMESSENEN ABFLUSSGANGLINIE AM
PEGEL LOUNY FÜR DAS HOCHWASSER VOM MÄRZ 1981
ABBILDUNG 10-3: VERGLEICH ZWISCHEN MODELLIERTEN UND GEMESSENEN SCHEITELWERTEN DES
ABFLUSSES AM PEGEL USTÍ NAD LABEM FÜR 30 MODELLIERTE HOCHWASSEREREIGNISSE
Abbildung 10-4: Modellergebnisse am Pegel Dresden für die Welle vom August 2006
AUF BASIS GEMESSENER UND MODELLIERTER GANGLINIEN IN USTÍ N. L
ABBILDUNG 10-5: VERGLEICH ZWISCHEN MODELLIERTEN UND GEMESSENEN SCHEITELWERTEN DES
ABFLUSSES AM PEGEL WITTENBERGE FÜR 30 MODELLIERTE HOCHWASSEREREIGNISSE
Abbildung 10-6: Vergleich der berechneten Scheitelabflussdifferenzen für den Ist-
ZUSTAND UND DEN ZUSTAND 2013 AN VERSCHIEDENEN PEGELN AN ELBE, MOLDAU UND
Eger für alle 30 analysierten Hochwasser
ABBILDUNG 10-7: MAXIMALE, ABSOLUTE BANDBREITEN DER TALSPERRENWIRKUNG ZWISCHEN
PRAG-CHUCHLE UND NEU DARCHAU
ABBILDUNG 10-8: MAXIMALE, RELATIVE BANDBREITEN DER TALSPERRENWIRKUNG ZWISCHEN
PRAG-CHUCHLE UND NEU DARCHAU
Abbildung 10-9: Scheitelreduzierende Wirkungen der Saale-Talsperren am Pegel
BARBY AN DER ELBE
ABBILDUNG 10-10: SCHEITELREDUZIERENDE WIRKUNG DER TALSPERRE LIPNO AM PEGEL PRAG-
CHUCHLE UND AM PEGEL USTÍ N. L. FÜR 30 HOCHWASSEREREIGNISSE
Abbildung 10-11: Berechnete Scheitelabflüsse und -reduktionen für alle 30
HOCHWASSER UND SECHS MODELLZUSTÄNDE AM PEGEL BARBY

ABBILDUNG 11-1: FÜR DIE ABLEITUNG DER TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN FESTGELEGTE
HOMOGENE TEILZEITRÄUME MIT DARSTELLUNG DER HOMOGENISIERUNGSVORSCHRIFTEN
FÜR DIE UMRECHNUNG IN DEN HOMOGENEN ZUSTAND 1890138
ABBILDUNG 11-2: DARSTELLUNG DER BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN BERECHNETEN
Scheitelabflüssen im Zustand "OS-oLi-oOr-oNe(1890) " und den jeweils
BERECHNETEN SCHEITELREDUKTIONEN BZW. SCHEITELABFLÜSSEN IM ZUSTAND
" <i>MS-mLi-mOr-mNe(2013)</i> " für den Pegel Wittenberge140
ABBILDUNG 11-3: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG VERSCHIEDENER AUSGLEICHSFUNKTIONEN
ZUR ABLEITUNG VON HOMOGENISIERUNGSVORSCHRIFTEN FÜR SOMMER- UND
WINTEREREIGNISSE AM PEGEL WITTENBERGE142
ABBILDUNG 11-4: ERGEBNISSE EXTREMWERTSTATISTISCHER BERECHNUNGEN AM PEGEL
WITTENBERGE FÜR HOMOGENE HQ-REIHEN, DIE MITTELS UNTERSCHIEDLICH STARK
DIFFERENZIERTER TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN ABGELEITET WURDEN
ABBILDUNG 11-5: SOMMER-WINTER-DIFFERENZIERTE TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN FÜR DEN
PEGEL WITTENBERGE ZUR UMRECHNUNG VOM ZUSTAND "OS-OLI-OOR-ONE(1890)" IN
"MS-MLI-MOR-MNE(2013)"144
Abbildung 11-6: Übersicht über alle für die Homogenisierung in den Zustand "2013"
VERWENDETEN TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN FÜR WINTEREREIGNISSE AM PEGEL
WITTENBERGE148
Abbildung 11-7: Übersicht über alle für die Homogenisierung in den Zustand "2013"
VERWENDETEN TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN FÜR SOMMEREREIGNISSE AM PEGEL
WITTENBERGE149
Abbildung 11-8: Übersicht über alle für die Homogenisierung vom Zustand 1890 in den
ZUSTAND 2013 VERWENDETEN TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN FÜR WINTEREREIGNISSE
ZWISCHEN DRESDEN UND NEU DARCHAU150
Abbildung 11-9: Inhomogene und homogene HQ-Reihe im Zustand "2013" für den Pegel
WITTENBERGE (OFFIZIELLE DATEN (OD))151
Abbildung 11-10: Inhomogene und homogene HQ-Reihe im Zustand "1890" für den Pegel
WITTENBERGE (OFFIZIELLE DATEN (OD))
Abbildung 12-1: Beispiel für die visuelle Prüfung der Anpassung mit Fokus auf den
BEREICH VON P 0,9 BIS 0,99 IN HQ-EX 3.0 (PEGEL WITTENBERGE)156
Abbildung 12-2: Beispiel für die Überprüfung der Konfidenzintervalle der
BESTANGEPASSTEN VF/PS157
Abbildung 12-3: Pegelbezogener Vergleich der HQ(T) für 3 verschiedene
Homogenisierungszustände158
Abbildung 12-4: Beispiel für den Abgleich der ermittelten HQ(T) im Längsprofil158
Abbildung 12-5: Vergleich der $HQ(T)$ am Pegel Barby für drei verschiedene
HOMOGENISIERUNGSZUSTÄNDE UNTER VERWENDUNG DER VF/PS IN DER KOMBINATION
WB3/MM (DATENBASIS: OD)
ABBILDUNG 12-6: ABGLEICH DER ERMITTELTEN $HQ(T)$ im Längsprofil unter Verwendung
der VF/PS gemäß Bericht BfG-1589 für den jeweils unhomogenisierten Zustand
(DATENBASIS: OD)
ABBILDUNG 12-7: AUSMAß DER TALSPERRENRETENTIONSWIRKUNG BEI UNTERSCHIEDLICHEN
HOCHWASSER-JÄHRLICHKEITEN (OD-DATEN)165

ABBILDUNG 12-8: AUSMAß DER TALSPERRENRETENTIONSWIRKUNG BEI UNTERSCHIEDLICHEN	
HOCHWASSER-JÄHRLICHKEITEN (WQE-DATEN)	165
ABBILDUNG 12-9: HOMOGENISIERUNGSDIFFERENZIERTE HQ(T) IM LÄNGSSCHNITT (DATENBASIS:	
OD)	166
ABBILDUNG 12-10: HOMOGENISIERUNGSDIFFERENZIERTE HQ(T) IM LÄNGSSCHNITT (DATENBASIS:	
WQE)	166
Abbildung 12-11: Vergleich der minutengenauen HQ mit den höchsten Tagesmitteln	
AM PEGEL WITTENBERGE	167
ABBILDUNG 12-12: PEGELBEZOGENE HQ(T) ENTLANG DER ELBE BEI MODIFIKATION DER	
AUSGANGSDATEN UNTER VERWENDUNG VON RETENTIONSBEREINIGTEN HQ-WERTEN FÜR	
DAS JAHR 1890 UND DEMGEGENÜBER UNMODIFIZIERTEN HQ-WERTEN	171
ABBILDUNG 12-13: HOMOGENISIERUNGSDIFFERENZIERTE HQ ₁₀₀ im Längsprofil (Datenbasis:	
WQE)1	173

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: BEDEUTENDE HOCHWASSER AN AUSGEWÄHLTEN MOLDAU- UND ELBEPEGELN IN
TSCHECHIEN12
TABELLE 2-2: HAUPT- UND EXTREMWERTE DES ABFLUSSES FÜR PEGEL DER ELBE IN DEUTSCHLAND17
TABELLE 2-3: SCHEITELABFLÜSSE DER HOCHWASSER 2002, 2006, 2011 UND 2013 AN DEN PEGELN
DER ELBE UND DEN WICHTIGEN NEBENFLÜSSEN
TABELLE 2-4: ÜBERBLICK ÜBER TALSPERREN UND GRÜNE RÜCKHALTEBECKEN $> 0,3$ Mio. m ³ im
TSCHECHISCHEN ELBEGEBIET
TABELLE 2-5: LISTE BEDEUTENDER TALSPERREN AN DER MOLDAU UND EGER UND IHRER
WESENTLICHEN MERKMALE
TABELLE 2-6: LISTE WEITERER WICHTIGER TALSPERREN IM TSCHECHISCHEN ELBEGEBIET UND IHRER
WESENTLICHEN MERKMALE
TABELLE 2-7: LISTE DER ZU DER SAALEKASKADE GEHÖRENDEN TALSPERREN UND IHRE
WESENTLICHEN MERKMALE
TABELLE 3-1: VERGLEICH DER SCHEITELABFLÜSSE MIT UND OHNE DEICHBRÜCHE(N) AN WICHTIGEN
Elbepegeln beim Hochwasser 2002
TABELLE 3-2: WIEDERKEHRINTERVALLE UND ZUGEHÖRIGE DURCHFLÜSSE FÜR DIE PEGEL DRESDEN,
TORGAU, BARBY, WITTENBERGE UND NEU DARCHAU BEIM ELBE-HOCHWASSER 201350
TABELLE 3-3: ABWEICHUNGEN DER MHQ (BEZUGSPERIODE 1890-2013) DER WQE-DATENSERIEN
VON DEN OD-DATENSERIEN
TABELLE 5-1: ÜBERSICHT ÜBER WESENTLICHE MERKMALE (SCHEITELABFLUSS, JÄHRLICHKEIT,
Wellendauer, Abflussfülle) für das Kollektiv der 30 ausgewählten Hochwasser
AN VIER PEGELN
TABELLE 7-1: SCHEITELABFLÜSSE DER "KLEINSTEREIGNISSE" DER SAALE AN DEN PEGELN
KAULSDORF UND HALLE-TROTHA UNTER ANGABE DES ZUGEHÖRIGEN MQ UND MHQ81
TABELLE 8-1: ÜBERSICHT ÜBER ART UND ZEITLICHE AUFLÖSUNG DER ZU PROJEKTBEGINN
VORWIEGEND DIGITAL VERFÜGBAREN ABFLUSS-/WASSERSTANDSDATEN IM TSCHECHISCHEN
Elbeeinzugsgebiet
TABELLE 8-2: VERFÜGBARKEIT UND ZEITLICHE AUFLÖSUNG VON WASSERSTÄNDEN, ZU- UND
Abflüssen für Speicherräume der Moldaukaskade und weiterer Talsperren für
ALLE 30 IM PROJEKT MODELLIERTEN HOCHWASSER
TABELLE 8-3: ZU PROJEKTBEGINN VORLIEGENDE GEMESSENE WASSERSTÄNDE AN PEGELN DER
Elbe und Zuflüssen
TABELLE 8-4: ÜBERSICHT ÜBER DIE FÜR DIE VERWENDUNG IM PROJEKT VERLÄNGERTEN
ABFLUSSKURVEN IM SAALEGEBIET UND AN DER SCHWARZEN ELSTER
TABELLE 8-5: VERFÜGBARE STÜNDLICHE ABFLÜSSE BZW. TAGESWERTE AN ELBE- UND
NEBENFLUSSPEGELN SOWIE HINWEISE AUF DATENLÜCKEN NACH ENDE DES
DIGITALISIERUNGSPROZESSES ANALOGER PEGELUNTERLAGEN
TABELLE 9-1: FLÄCHE, ZEITRAUM UND LAGE VON VERLORENEN UND GEWONNENEN
ÜBERSCHWEMMUNGSFLÄCHEN AN DER ELBE110

TABELLE 10-1: ÜBERSICHT ÜBER DIE UNTERSCHIEDLICHEN MODELLZUSTÄNDE UND IHRE
CHARAKTERISTIKA121
TABELLE 10-2: VERGLEICH GEMESSENER UND MODELLIERTER SCHEITELABFLÜSSE DES WTM-
MODELLS DER SAALE
TABELLE 10-3: VERGLEICH GEMESSENER UND MODELLIERTER SCHEITELABFLÜSSE DES
TSCHECHISCHEN MODELLSYSTEMS
TABELLE 10-4: VERGLEICH GEMESSENER UND MODELLIERTER SCHEITELABFLÜSSE DES SOBEK-
MODELLS DER ELBE FÜR ZWEI IST-ZUSTÄNDE DES SOBEK-MODELLS
TABELLE 11-1: ANZUWENDENDE HOMOGENISIERUNGSVORSCHRIFTEN FÜR DIE UMRECHNUNG IN
DEN ZUSTAND 1890 BEI NUTZUNG BZGL. DER HOCHWASSERGENESE UNDIFFERENZIERTER
TRANSFORMATIONSFUNKTIONEN
TABELLE 12-1: UNTERSUCHUNGEN AUF HOMOGENITÄT, TREND UND SPRUNG 154
TABELLE 12-2: RESULTATE DER STATISTISCHEN HOCHWASSERANALYSE FÜR OD, HOMOGENISIERT
AUF ZUSTAND 1890 OHNE TALSPERREN (KONFIDENZINTERVALL 95%)162
TABELLE 12-3: RESULTATE DER STATISTISCHEN HOCHWASSERANALYSE FÜR OD, NICHT
HOMOGENISIERT (KONFIDENZINTERVALL 95 %)162
TABELLE 12-4: RESULTATE DER STATISTISCHEN HOCHWASSERANALYSE FÜR OD, HOMOGENISIERT
AUF DEN ZUSTAND 2013 (KONFIDENZINTERVALL 95 %)163
TABELLE 12-5: RESULTATE DER STATISTISCHEN HOCHWASSERANALYSE FÜR WQE,
HOMOGENISIERT AUF ZUSTAND 1890 OHNE TALSPERREN (KONFIDENZINTERVALL 95 %)163
TABELLE 12-6: RESULTATE DER STATISTISCHEN HOCHWASSERANALYSE FÜR WQE, NICHT
HOMOGENISIERT (KONFIDENZINTERVALL 95%)164
TABELLE 12-7: RESULTATE DER STATISTISCHEN HOCHWASSERANALYSE FÜR WQE,
HOMOGENISIERT AUF DEN ZUSTAND 2013 MIT TALSPERREN (KONFIDENZINTERVALL 95%)164
TABELLE 12-8: MITTLERE ABWEICHUNG DER JÄHRLICHEN ECHTEN SCHEITELWERTE (HQ) VON DEN
JÄHRLICHEN HÖCHSTEN TAGESMITTELN (TQMAX) AN NEUN ELBEPEGELN
TABELLE 12-9: DEICHBRUCHBEZOGENE RETENTIONSKORREKTUREN FÜR DAS EREIGNIS 1890 AN
DEN ELBEPEGELN IM VERGLEICH ZU UNMODIFIZIERTEN WERTEN, DATENBASIS WQE170

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
Abb.	Abbildung
AE	Allgemeine Extremwertverteilung / Methode der Wahrscheinlichkeitsgewichte- ten Momente
A_{Eo}	oberirdisches Einzugsgebiet
AquaLog	Modellierungssystem der Firma AquaLogic Consulting
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BKG	Bundesamt für Kartografie und Geodäsie
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
bspw.	beispielsweise
BTU	Brandenburgische Technische Universität
BWaStr	Bundeswasserstraße
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
ČHMÚ	Český Hydrometeorologický Ústav (Tschechisches Hydrometeorologisches
COXDI	Institut Cox-Stuart-Dispersions-Test
CZ	Tschechische Republik
D	Deutschland
Δ	Differenz
DB	Datenbank
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
DGM-W	Digitales Geländemodell des Wasserlaufs
d. h .	das heißt
DOP	Digitales Orthophoto
DTK25	Digitale Topografische Karte 1:25.000
DSS	Data Storage System (von HEC-RAS)
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau; <i>hier:</i> DVWK-Merkblätter im DWA-Regelwerk

DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
E1	Extremwertverteilung Typ 1
engl.	Englisch
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EZG	Einzugsgebiet
FGG	Flussgebietsgemeinschaft
FLYS	Flusshydrologischer Fachdienst der BfG
FuE	Forschung und Entwicklung
FQS	Fehlerquadratsumme
ggf.	gegebenenfalls
GIS	Geografisches Informationssystem
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Centers River Analysis System
HHW	höchster bisher registrierter Wasserstand
HQ	höchster Abfluss eines Zeitraums / der Reihe
HQ(a)	Höchster Scheitelwert im Abflussjahr
$HQ(T), HQ_T$	T-jährlich zu erwartender Hochwasserabfluss
HSK	Hochwasserstudienkommission
HW	Hochwasser
i. d. R.	in der Regel
IKSE	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
INTERREG	Gemeinschaftsinitiative des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung zur Förderung der Zusammenarbeit zwischen EU-Mitgliedstaaten und benachbar- ten Nicht-EU-Ländern
ISO	Internationale Organisation für Normung (International Organization for Standardization)
Kap.	Kapitel
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KW2(3)SP	Kruskal-Wallis-2(3)-Stichproben-Test
KS	Kolmogorov-Smirnov-Test
LABEL	EU-Projekt "Anpassung an das Hochwasserrisiko im Elbeeinzugsgebiet" (2008-2012)

LAHOR	Projekt "Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbau- maßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet" (bis 2001)						
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie						
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt						
LN3	Log. Normal-Typ-3-Verteilung						
lt.	laut						
LUGV	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Brandenburg						
MHQ	mittlerer Hochwasserabfluss eines Zeitraums / einer Reihe						
МК	Mann-Kendall-Signifikanztest						
MLM	Maximum-Likelihood-Methode						
MM	Momentenmethode						
MNQ	mittlerer Niedrigwasserabfluss eines Zeitraums / einer Reihe						
MQ	mittlerer Abfluss eines Zeitraums / einer Reihe						
N-A-Modell	Niederschlag-Abfluss-Modell						
NHN	Normalhöhennull						
NHWSP	Nationales Hochwasserschutzprogramm des Bundes und der Länder						
NN	Normalnull						
n. L.	nad Labem (an der Elbe)						
$n\omega^2$	Summe der quadratischen Wahrscheinlichkeitsdifferenzen						
OD	offizielle Daten (im Vergleich zu den Projektdaten WQE s. u.)						
Р	Eintritts-/Unterschreitungswahrscheinlichkeit						
Р3	Pearson-Typ-3-Verteilung						
РОН	Einzugsgebietsverwaltung Eger (Povodí Ohře)						
Q(t)	Abfluss(ganglinie)						
R ²	Bestimmtheitsmaß						
RB	Randbedingung						
rd.	rund						
rp	Quantilkorrelations-Test						
S	Sommer (als Abkürzung in Tab. 2-6 und 2.7)						
s. o. / s. u.	sieoben / siehe unten						
S.	Seite						
sog.	sogenannte						
SOBEK	Krokodilgott der ägyptischen Mythologie; <i>hier:</i> eindimensionale, hydrodyna- misch-numerische Simulationssoftware der Firma Deltares						

Tab.	Tabelle					
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie					
TQ / tQ	Tagesmittelwert des Abflusses					
tQmax	Jährliche höchste Tagesmittelwerte des Abflusses					
TW	Tagesmittelwert des Wasserstands					
u.	und					
u. a.	unter anderem					
UBA	Umweltbundesamt					
ü. (M.)	ü. (Meeresspiegel)					
UP	Unterpegel					
USACE	U.S. Army Corps of Engineers					
ÜSG	Überschwemmungsgebiet					
v. a.	vor allem					
VF/PS	Verteilungsfunktion / Parameterschätzung					
vgl.	Vergleiche (als Verweis auf eine nicht wortwörtlich, sondern umschrieben zitierte Stelle aus einer Informationsquelle)					
Vol / V / V(t)	Volumen(ganglinien)					
VÚV TGM /	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka,					
w U v	Winter (als Abkürzung in Tab. 2-6 und 2.7)					
W	Wasserstand					
WAVOS	Wasserstandsvorhersagesystem der BfG					
WB3	Weibull-Typ-3-Verteilung					
WGM	Methode der Wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente					
WISKI	Wasserstandsinformationssystem der Firma KISTERS					
WQE	Projektdaten "WQ-Elbe 1890"					
WSA / WSÄ	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt /-ämter					
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes					
WTM	Wellentransformationsmodell der BfG					
z. B.	zum Beispiel					

1 Einleitung und Veranlassung

Im Rahmen des EU-INTERREG-Projekts LABEL "Anpassung an das Hochwasserrisiko im Elbeeinzugsgebiet" (vgl. GRAFE ET AL. 2010) und aufgrund einer vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) beauftragten ad hoc-Untersuchung im Nachgang des extremen Elbehochwassers vom Juni 2013 führte die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Zusammenarbeit mit dem tschechischen Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft (VÚV TGM) und der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) modellgestützte Hochwasserablaufberechnungen an der Saale und der Elbe durch. Ermittelt wurde hiermit die Wirkung tschechischer und thüringischer Rückhalteräume in Talsperren an Moldau, Eger und Saale auf die Elbehochwasser vom August 2002, April 2006, Januar 2011 und Juni 2013 in der Tschechischen Republik und Deutschland (BFG 2012, BFG 2013, IKSE 2012). Wie aus Abbildung 1-1 ersichtlich wird, sind die Effekte der tschechischen und thüringischen Retentionsmaßnahmen, nicht nur, wie zuvor angenommen (vgl. bspw. IKSE 2009), regional grenzüberschreitend bis in den Raum Dresden scheitelmindernd wirksam, sondern machen sich stromabwärts an der gesamten frei fließenden Elbe bis Hamburg positiv bemerkbar.



Abbildung 1-1: Berechnete streckengemittelte Reduktionen der Scheitelwasserstände aufgrund des Talsperreneinsatzes in Tschechien und an der Saale bei den Elbe-Hochwassern 2002, 2006, 2011 und 2013 entlang der frei fließenden Elbe in Deutschland (nach BUSCH ET AL. 2016)

Entsprechend der Berechnungen aus dem Jahr 2011 (BFG 2012) wurde in den vier großen Talsperren an der Moldau (oberhalb von Prag), Eger und Saale beispielsweise im Verlauf des Hochwassers 2006 ein enormes Wasservolumen von über 500 Mio. m³ zurückgehalten, was bei diesem bedeutsamen Hochwasser entlang der Mittleren Elbe unterhalb der Muldemündung zu Wasserstandsabsenkungen im Scheitel von bis zu 70 cm führte (Abb.1-1).

Seit dem Bau der tschechischen Talsperren profitieren die Unterlieger an der deutschen Elbestrecke bei Hochwasser (und auch bei Niedrigwasser) in einem derart hohen Maße von deren Wirkung wie vergleichsweise an keinem anderen großen deutschen Gewässer. Dieser für den Hochwasserschutz positive Effekt führt heute jedoch dazu, dass für die Aufstellung der langen Reihen mit Jahreshöchstabflüssen (HQ-Reihen) der Elbepegel (ab 1890) und der daraus folgenden Ermittlung der hydrologischen Extremwertstatistik besondere Randbedingungen gelten. Da die in den bisher verwendeten HQ-Reihen zusammengestellten gemessenen Scheitelabflüsse (vgl. BELZ ET AL. 2008) - je nach Realisierungszeitpunkt der großen Talsperren in Tschechien (vor 1968) und der Saale (vor 1933) - unterschiedlich stark durch die Wirkung der genannten Rückhalteräume überprägt werden, sind die Reihen hinsichtlich dieses Effekts als nicht homogen (im Text als Synonyme verwendet: inhomogen, unhomogen) zu betrachten. Für verbesserte extremwertstatistische Untersuchungen ist eine homogene Datengrundlage zu schaffen (Kap. 3, vgl. bspw. DYCK 1980).

Deshalb sind die vorliegenden Pegelreihen unter Zuhilfenahme mathematischer Abflussmodelle mit (also auf den Zustand "2013") und ohne Wirkung dieser Talsperren (d. h. auf den Zustand "1890") zu homogenisieren, um sie dann als Grundlage einer aktualisierten und verbesserten Extremwertstatistik verwenden zu können (BFG ET AL. 2013). Zu diesem Zweck haben die Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) und die BfG im Mai 2013 einen Kooperationsvertrag über die Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes "Homogenisierung von HQ-Reihen (1890-2013)" für deutsche Elbepegel abgeschlossen. Hierin wurde auch vereinbart, dass die Untersuchungen in der BfG mit einer projektbegleitenden Expertengruppe abzustimmen sind, die mit Hydrologen aus Deutschland und Tschechien besetzt ist. Wie im LABEL-Projekt auch, sind an den Berechnungen das VÚV TGM und die TLUG zu beteiligen. Als Grundlage der Homogenisierung sind vereinbarungsgemäß die um die Messwerte von 2007-2013 erweiterten, inhomogenen HQ-Reihen der Jahre 1890 bis 2006 von neun deutschen Pegeln zu verwenden, die bereits Gegenstand von Untersuchungen der FGG-Arbeitsgruppe "Erstellung einer länderübergreifenden Hochwasserstatistik für die Elbe" waren (BELZ ET AL. 2008). Aufgrund der nachfolgend skizzierten Veranlassung wurde der Untersuchungsauftrag darüber hinaus erweitert.

Eine der vordringlichen Aufgaben der quantitativen Gewässerkunde ist es, auf Messungen basierte, hydrologische Grundlagen bereitzustellen, um z. B. wasserwirtschaftliche Planungen an Gewässern auf einer gesicherten Datenbasis vornehmen zu können. Messungen hydrologi-

scher Größen, darauf basierende Auswertungen sowie die Erstellung hydraulischer Abflussmodelle sind aber mehr oder weniger zwangsläufig mit Unsicherheiten verbunden. Deshalb ist es wichtig, die Unsicherheiten in gemessenen und berechneten Daten zu minimieren, wobei insbesondere die genaue Kenntnis des Abflusses von großer hydrologischer Bedeutung ist. Da in natürlichen Gewässern in Abhängigkeit von der gewässermorphologischen Situation die lokalen Durchflüsse von langfristigen Änderungen betroffen sein können, müssen Abflusskurven regelmäßig durch Abflussmessungen überprüft und bei Bedarf neue Kurven vom Pegelbetreiber eingeführt werden. In zahlreichen Untersuchungen (BELZ ET AL. 2008, BFG 2009) wurden Implausibilitäten verschiedener Art im Zusammenhang mit Abflusskurven für Elbepegel festgestellt. Zum Beispiel zeigt die zeitliche Auswertung der für den Pegel Dresden (Abb. 1-2) gültigen bzw. ehemals gültigen Abflusskurven, dass hier der Wasserstand für einen Abfluss von 4.260 m³/s, der nach heutiger Festlegung (BFG 2009) einem 100jährlichen Ereignis entspricht, seit 1995 um fast 90 cm angestiegen ist. Hierfür existiert keine plausible morphologisch-hydraulische Erklärung.



Abbildung 1-2: Zeitliche Auswertung der im Zeitraum seit 1939 eingeführten Abflusskurven am Pegel Dresden für Abflüsse, die einem HQ₁₀₀, HQ₁₀, MHQ und MQ (gemäß BFG 2009) entsprechen (FLUSSHYDROLOGISCHER FACHDIENST FLYS, Stand: 08/2017)

Die BfG beauftragte das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Projekts "Verbesserung der hydrologischen Datengrundlage an der Elbe (W-Q Elbe 1890)" die vorliegenden Abflusskurven für zahlreiche deutsche Elbepegel zu überprüfen und bei Bedarf zu überarbeiten sowie einheitlich auf das Jahr 1890 zu ergänzen (HELMS ET AL. 2016B). Dem

> entsprechend hat in der Sitzung der projektbegleitenden Expertengruppe in Prag am 30. November 2016 die deutsche Delegation beschlossen, die erforderlichen Arbeiten zur Homogenisierung und die statistischen Berechnungen auch für die nicht homogenen HQ-Reihen durchzuführen, die unter Hinzunahme der neuen, vom KIT erstellten Abflusskurven entstanden sind. Von den zuständigen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern wurden diese neuen Kurven bisher zwar nicht offiziell eingeführt, sie ermöglichen es aber, die Extremwertstatistik für Elbepegel sowohl um die vorhandenen Inhomogenitäten aufgrund des Talsperrenbetriebs bei Hochwasser als auch um die Effekte, die aus der Verwendung implausibler, alter Abflusskurven entstehen, zu bereinigen und somit substanziell zu verbessern. Festzustellen, welcher der Einflüsse letztlich bei der Anpassung der HQ-Statistik dominiert, ist auch Ziel der hydraulisch-statistischen Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts.

> Im vorliegenden Bericht BfG-1938 werden nach Vorstellung der hydrologischen Verhältnisse im internationalen Elbegebiet (Kap. 2) zunächst die inhomogenen HQ-Reihen (Kap. 3), die übergeordnete Vorgehensweise im Projekt (Kap. 4) und in Kapitel 7 die eingesetzten hydraulischen Modelle beschrieben. In den Kapiteln 5 bis 6 und 8 wird der Auswahl von charakteristischen Hochwassern mit unterschiedlicher Genese im Elbegebiet, der Wahl der zu berücksichtigenden Talsperren und der somit notwendigen Aufbereitung der hydrologischen Modelleingangsdaten breiten Raum gegeben. Kapitel 10 erläutert die Modellberechnungen und deren Ergebnisse.

> Weitere über die Talsperrenwirkung hinausgehende Einflüsse auf den Hochwasserablauf an der Elbe werden in der Vorhabensbeschreibung ebenfalls adressiert (BFG ET AL. 2013) und im Rahmen dieses Projekts schlaglichtartig behandelt. Seit langem wird im Expertenkreis über die Wirkung von im 20. Jahrhundert vorgenommenen Eindeichungen an der Elbe und von Abriegelungen der Nebenflüsse auf den Hochwasserablauf der Elbe diskutiert (vgl. SIMON 1983, SIMON 1996). Die in diesem Zusammenhang in einem begleitenden, BfG-finanzierten Projekt in Zusammenarbeit mit den Elbanliegerländern erfolgte Datenerhebung zu seit 1890 verlorenen bzw. zurückgewonnenen Überschwemmungsgebieten und exemplarische, modellbasierte Wirkungsabschätzungen von Überschwemmungsgebieten an Elbe und Havel auf Elbehochwasser werden in Kapitel 9 beschrieben.

Im Zentrum dieses Berichts steht jedoch die Darstellung der Vorgehensweise zur Erstellung homogener HQ-Reihen für die Zustände "1890" (ohne Talsperren) und "2013" (mit Talsperren) für deutsche Elbepegel mittels Transferfunktionen (Kap. 11) und die Auswertung der Ergebnisse der darauf basierenden Pegelstatistik (Kap. 12). Der vertraglich vereinbarte Vergleich der verbesserten Extremwertstatistik mit den bisher gültigen Hochwasserabflüssen HQ(T), die auf inhomogenen Reihen basieren, wird exemplarisch für das 100-jährliche Hochwasser der Elbe ebenfalls in Kapitel 12 geführt. Da im Rahmen dieses hydraulischstatistisch ausgerichteten Vorhabens umfangreiche hydrologische Grundlagendaten an Pegeln

der Elbe zu ermitteln und zu verbessern waren, wurde im vorliegenden Bericht auf die Nachvollziehbarkeit der Untersuchungsschritte, der vorgenommenen Datenerhebung und -generierung, der involvierten Berechnungsmethoden, der Ergebnisplausibilisierung, Analysen und Auswertungen großen Wert gelegt. Mit einer Zusammenfassung und Empfehlungen für mögliche bzw. notwendige zukünftige Untersuchungen schließt der Bericht, zu dem ein ausführlicher Anlagenband zählt (Kap. 13/14). Bundesanstalt für Gewässerkunde

2 Die hydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Elbe

Die Elbe ist mit einer Länge von 1.094 km von ihrer Quelle im tschechischen Riesengebirge bis zu ihrer Mündung in die Nordsee bei Cuxhaven und einem oberirdischen Einzugsgebiet von 148.268 km² das viertgrößte Flussgebiet Mitteleuropas (IKSE 2005). Wie Abbildung 2-2 zeigt, besitzen vier europäische Staaten Flächenanteile an diesem Gebiet. Während diese in Österreich (0,62 %) und Polen (0,16 %) jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielen, entfallen mit 65,54 % auf Deutschland und mit 33,68 % auf Tschechien die größten Anteile. Nach morphologischen Unterscheidungskriterien teilt man den Elbelauf in drei Abschnitte: die **Obere Elbe** von der Quelle bis Schloss Hirschstein (Elbe-km 96), die **Mittlere Elbe** bis zum Wehr Geesthacht (Elbe-km 585,9) und die tidebeeinflusste **Untere Elbe** bis zur Mündung in die Nordsee (Elbe-km 727,7).

2.1 Der tschechische Teil des Einzugsgebiets der Elbe

Der tschechische Lauf der Elbe besitzt eine Länge von 358,3 km und umfasst bis zum Pegel Hřensko an der tschechisch-deutschen Grenze ein Einzugsgebiet von 51.408 km² (Abb. 2-1).



Abbildung 2-1: Entwicklung des oberirdischen Einzugsgebiets der Elbe in Tschechien

> Moldau und Eger stellen die beiden größten Elbezuflüsse in Tschechien dar. Mit einer Länge von 430,3 km und einer Einzugsgebietsfläche von 28.090 km² entwässert die Moldau zusammen mit der Eger (Länge: 304,6 km; Einzugsgebietsfläche: 5.614 km²) etwa 65 % des gesamten tschechischen Elbeeinzugsgebiets. Die Moldau mündet oberstrom des Pegels Mělník in die Elbe, während der Zusammenfluss von Elbe und Eger auf Höhe der Stadt Leitmeritz (Litoměřice) liegt (Abb. 2-2).



Abbildung 2-2: Das Einzugsgebiet der Elbe (mit Darstellung der Teileinzugsgebiete, Zuflüsse, Pegel und wichtiger Talsperren in Tschechien und Deutschland) (BFG 2012)

In Abbildung 2-3 sind die jahreszeitlichen Schwankungen der monatlichen mittleren Abflüsse (Zeitraum 1961-2013) an verschiedenen tschechischen Pegeln abgebildet. Die mittleren Jahresabflussganglinien der Pegel Brandýs (oberhalb der Moldaumündung), Mělník und Ústí nad Labem (unterhalb der Moldau- bzw. Egermündung) beschreiben die saisonalen Abflussverhältnisse der Elbe. Für die Moldau werden diese am Pegel Prag-Chuchle deutlich, welcher sich südlich der tschechischen Hauptstadt Prag befindet. An der Eger unterhalb der Talsperre Nechranice liegt der Pegel Louny. Hervorgerufen durch die Schneeschmelze werden die höchsten Abflüsse in allen Gewässern typischerweise während der Frühjahrsmonate (Februar - April) erreicht. Die niedrigsten Abflüsse lassen sich hingegen im Sommer und Herbst feststellen. Die Jahresabflussganglinien in Abbildung 2-3 zeigen jedoch für die Moldau zwei kleine Abflussmaxima in den Monaten Juni und August. Diese sind auf den Einfluss der Hochwasser vom Sommer 2002 und 2013 zurückzuführen, welcher in der ausgewerteten Datenreihe 1961-2013 sichtbar wird.



Abbildung 2-3: Mittlere Jahresabflussganglinien für die Pegel Louny (Eger), Chuchle (Moldau), Brandýs (Elbe), Mělník (Elbe) und Ústí nad Labem (Elbe); Datenreihe 1961-2013 (BALVÍN ET AL. 2017)

Die Ursachen für die Entstehung von Elbehochwassern in Tschechien können sehr unterschiedlich sein und werden i. d. R. wie folgt unterteilt:

• *Winter- und Frühjahrshochwasser*, die durch eine Kombination aus Schneeschmelze und Starkregenereignissen hervorgerufen werden; z. B. das Hochwasser im April 2006,

- *Sommerhochwasser*, die durch großräumige, lang andauernde Regenfälle ausgelöst werden; bspw. die Hochwasser im August 2002 und im Juni 2013,
- Sommerhochwasser, die durch wolkenbruchartige Starkregenereignisse in verhältnismäßig kleinen Einzugsgebieten verursacht werden und zu Sturzfluten (engl.: "flash floods"), wie im Juni und Juli 2009 oder im August 2010, führen.

Da das hydrologische Regime der Elbe in Tschechien hauptsächlich durch die Prozesse der Schneeakkumulation, Schneeschmelze und Regen beeinflusst wird, kann es in die Kategorie des Regen-Schnee-Typs eingeordnet werden (IKSE 2005). Abbildung 2-4 zeigt für den Pegel Děčín die Bedeutung von Winter- und Frühjahrshochwassern auf, die - wie beschrieben - überwiegend durch eine Kombination aus Schneeschmelze und Starkregenereignis hervorgerufen werden. Da das gesamte tschechische Elbe-Einzugsgebiet von Gebirgsregionen geprägt ist, können solche Ereignisse ihren Ursprung in beinahe allen größeren Teileinzugsgebieten haben.



Abbildung 2-4: Jährliche Hochwasserscheitelabflüsse am Pegel Děčín (Jahresreihe 1890-2013, farbliche Unterteilung in Sommer- und Winterereignisse; Daten: KOTYZA ET AL. 1995; IKSE 2005; ČHMÚ)

Der Entwicklung von Elbehochwassern wird in der Regel durch den wichtigsten Nebenfluss, die Moldau, signifikant beeinflusst. Die historischen hydrologischen Aufzeichnungen zeigen, dass die größten Ereignisse am Elbepegel in Dresden ihren wesentlichen Ursprung im Einzugsgebiet der Moldau besitzen (IKSE 2005). Deren Bedeutung wird vor allem auch dann deutlich, wenn man berücksichtigt, dass die Einzugsgebietsfläche der Moldau (vgl. Abb. 2-1) am Zusammenfluss mit der Elbe in Mělník (28.090 km²) mehr als doppelt so groß ist wie das dortige Einzugsgebiet der Elbe (13.714 km²).

Sommer- (z. B. 2002, 2013) und Winterhochwasser (z. B. 2006, 2011) unterscheiden sich im tschechischen Einzugsgebiet der Elbe in der Regel deutlich anhand ihrer Dauer und ihrer Abflussfülle (Abb. 2-5). Winterereignisse können, in dem Maße wie der Schnee graduell zuerst in den mittleren Lagen und dann in den Kammlagen abschmilzt, in mehreren Wellen ablaufen. Deshalb sind Abflussfülle und Dauer dieser Hochwasser meist wesentlich größer als bei typischen Sommerereignissen. Aufgrund der hohen Wassersättigung des Bodens während der Schneeschmelze sind im Winter und im Frühjahr die hydrologischen Voraussetzungen gegeben, dass Hochwasser schon durch kleinere Regenereignisse (mit einer Niederschlagshöhe von nur wenigen 10 mm) ausgelöst werden können.



Abbildung 2-5: Abflussganglinien der Hochwasser 2002, 2006, 2011 und 2013 an den Pegeln Prag-Chuchle (Moldau) und Ústí n. L. (Elbe); Zeitachse normiert – alle Hochwasser mit identischem Scheitelzeitpunkt in Ustí n. L.

Hierzu gegensätzlich stellt sich die Situation während der Sommermonate dar. In der Regel ist der Boden trocken / nicht wassergesättigt und besitzt somit eine sehr große Fähigkeit gefallenen Niederschlag zwischenzuspeichern. Unter solchen Bedingungen können auch Ereignisse mit 30-50 mm Niederschlagshöhe den Abfluss aus dem Einzugsgebiet nicht nachhaltig beeinflussen. Allerdings ist es möglich, dass während Sommerhochwassern auch große Anteile der durchschnittlichen, jährlichen Niederschlagssumme in relativ kurzer Zeit fallen, wobei diese Effekte noch durch orografische Einflüsse in den Kammlagen der Gebirge verstärkt werden. Für Sommer- und Winterhochwasser gilt, dass die unterschiedlichen Typen der

Hochwassergenesen nicht auf bestimmte Regionen in Tschechien beschränkt sind, sondern in jedem Teileinzugsgebiet der Elbe auftreten können.

Tabelle 2-1: Bedeutende Hochwasser an ausgewählten Moldau- und Elbepegeln in Tschechien (Daten:KOTYZA ET AL. 1995; IKSE 2005; ČHMÚ)

DatumAlfussJährlichkeitMatussJährlichkeitMatussJährlichkeitm/*311m/*311m/*311 <td< th=""><th colspan="2">Pegel Prag-Chuchle</th><th colspan="3">Pegel Brandýs n.L.</th><th colspan="3">Pegel Ústí n.L.</th></td<>	Pegel Prag-Chuchle		Pegel Brandýs n.L.			Pegel Ústí n.L.			
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Datum	Abfluss	Jährlichkeit	Datum	Abfluss	Jährlichkeit	Datum	Abfluss	Jährlichkeit
29.03.1845 4500 100-200 30.03.1845 1560 >100 30.03.1845 5350 >200 23.01.1846 920 1-5 1846 - - 1850 - - 02.03.1855 2220 10 1855 - - 0.30.1855 3170* 10-50 10.02.1856 1660 5 1856 - - 11.02.1856 2320* 5-10 31.03.1860 1960 5-10 1860 - - 0.20.41865 2370* 10-50 0.20.21862 3950 100 1862 - - 0.30.11867 2840* 10-50 0.20.1867 2160 10 1867 - - 20.01867 240* 100 14.02.1877 1219 1-5 1877 - - 15.02.1877 2080 1-5 0.20.1886 2002 5-10 0.30.1885 563 1-5 13.03.188 2400 100 12.01.888		[m³/s]	[a]		[m³/s]	[a]		[m³/s]	[a]
23.01.1846 920 1-5 1846 - - 1850 - - 1850 - - 1855 - - 03.03.1855 31.70* 10.50 10.02.1855 1220 10 1855 - - 11.02.1856 2370* 5-10 31.03.1860 1960 5-10 1860 - - 02.04.1960 2320* 5-10 020.21.862 3950 1000 1862 - - 03.02.1862 4820* 200 08.04.1865 3300 50 05/1872 - - 05/1872 2840* 10.50 05/1872 3300 50 05/1872 - - 13.01.1867 2840* 1.5 19.02.1876 2674 10.50 1876 - - 13.03.1881 2480 5-10 29.12.1882 2600 10 04.01.1883 510 1-5 03.01.1883 2670 10 20.3.1888 170 <td>29.03.1845</td> <td>4500</td> <td>100-200</td> <td>30.03.1845</td> <td>1560</td> <td>>100</td> <td>30.03.1845</td> <td>5350</td> <td>>200</td>	29.03.1845	4500	100-200	30.03.1845	1560	>100	30.03.1845	5350	>200
1850 - - 1850 - - 1850 - - 02.03.1855 2220 10 1855 - - 03.03.1855 3170* 10.50 02.03.1855 2220 10 1860 - - 03.03.1855 2370* 5-10 02.02.1862 3950 100 1862 - - 03.02.1862 3300* 10-50 29.01.1867 2160 10 1867 - - 03.01.1867 2840* 10.50 29.01.1867 2160 10 1867 - - 05.1872 2940* 1-5 19.02.1876 2674 10-50 1876 - - 15.03.188 2400 1-10 20.1877 1219 1-5 1877 - - 15.03.188 2400 1-5 20.1888 2600 10 04.01.1883 510 1-5 13.03.188 2400 100 20.1888 2002	23.01.1846	920	1-5	1846	-	-	1846	-	-
02.03.1855 2220 10 1855 - - 03.013860 3170* 10.02 10.02.1856 1660 5 1856 - - 11.02.1856 2370* 5-10 02.02.1862 3950 100 1862 - - 03.02.1862 4820* 200 03.04.1865 2370 10-50 1865 - - 10.01.1867 2840* 10-50 05/1872 3300 50 05/1872 - - 05/1872 2940* 1-5 1902.1876 2674 10-50 1877 - - 15.02.1877 080 1-5 980.31881 1708 5 1881 - - 13.01.186 2670 10 230.1886 2020 5-10 0.40.1.488 510 1-5 0.31.1881 2480 5-10 230.1888 1820 5-10 15.03.188 563 1-5 13.03.1886 2700 10-50 20.33.1886	1850	-	-	1850	-	-	1850	-	-
10.02.1856 1660 5 1856 - - 11.02.1856 2370* 5-10 31.03.1840 1960 5-10 1860 - - 02.01.1862 2320* 5-10 02.02.1862 2370 10-50 1865 - - 03.02.1862 3390* 10-50 29.01.1867 2160 10 1867 - - 31.01.1867 2840* 10-50 905/1872 3300 50 05/1872 - 05/1872 2040* 1-5 1902.1876 2674 10-50 1876 - - 15.02.1877 2040* 1-5 1902.1876 2674 10-50 1877 - - 15.03.1883 2480 5-10 29.12.1882 2260 10 04.01.1883 510 1-5 3.03.1883 2600 10 20.31.881 1820 5-10 15.03.1888 563 1-5 13.03.1888 2600 10 20.01.880 <	02.03.1855	2220	10	1855	-	-	03.03.1855	3170*	10-50
31.03.1860 1960 5-10 1860 - - 02.02.1862 23950 100 1862 - 0.02.1862 4820* 200 02.02.1862 3370 10-50 1865 - - 10.04.1865 3390* 10-50 29.01.1867 2160 10 1865 - - 05/1872 2300* 10-50 190.21876 2674 10-50 1876 - - 20.02.1876 4210* 100 1402.1877 1219 1-5 1876 - - 15.03.1881 2480 5-10 123.1884 1708 5 1881 - - 15.03.1883 2670 10 23.03.1886 2002 5-10 03.01.1883 563 1-5 13.03.1888 2600 10 20.01.898 1820 5-10 15.03.1888 563 1-5 13.03.1889 2000 5-10 20.03.1891 1900 10-50 80.31.891 2400 5-10 260.51.896 250 10-50 20.03.1891 150 00	10.02.1856	1660	5	1856	-	-	11.02.1856	2370*	5-10
02.02.1862 3950 100 1862 0.30.2.1862 4320* 200 08.04.1865 2370 10.50 1865 10.04.1865 3300 10.50 05.1872 2300 50 05/1872 05/1872 2040* 1-5 19.02.1876 2674 10.50 1876 - 20.02.1876 4210* 100 1402.1877 1219 1-5 1877 - 13.03.1881 2480 5-10 29.12.1882 2260 10 04.01.1883 510 1-5 03.01.1883 2670 10 23.03.1886 2002 5-10 15.03.1888 563 1-5 13.03.1886 2790 10-50 04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.09.1890 4400 100-200 70.3.1891 1540 1-5 09.03.1891 1090 1-5 28.03.1895 2950 10-50	31.03.1860	1960	5-10	1860	-	-	02.04.1960	2320*	5-10
08.04.1865 2370 10-50 1865 10.04.1865 3390* 10-50 29.01.1867 2160 10 1867 31.01.1867 24.04* 1.5 19.02.1876 2674 10-50 1876 20.02.1876 4210* 100 14.02.1877 1219 1.5 1877 13.03.1881 2480 5-10 08.03.1881 1708 5 1881 13.03.1883 2670 10 23.03.1886 2002 5-10 03.04.1886 425 1 24.03.1886 2670 10.0 23.03.1885 2090 5-10 0.03.1891 1090 10-50 08.03.1891 2400 5-10 20.03.1891 150 0.05.1896 456 1 0.60.1896 2950 10-50 0.05.1896 2470 10-50 08.04.190 510 0.05.196 451 10.04.1903 561	02.02.1862	3950	100	1862	-	-	03.02.1862	4820*	200
29.01.1867 2160 10 1867 31.01.1867 28.40* 10-50 05/1872 3300 50 05/1872 05/1872 20/04 1.5 1902.1876 2674 10-50 1876 15.02.1877 2080 1.5 0803.1881 1708 5 1881 - - 15.03.1881 2400* 100 23.01.886 2002 5-10 03.04.1883 510 1.5 03.01.1883 2670 10 12.03.1888 1820 5-10 15.03.1888 563 1.5 13.03.1888 2000 10-0 10.40.91890 3975 100 07.09.1890 469 1 0.60.60.1890 4400 100-200 070.31891 150 0.2.0.41895 572 1.5 28.0.31895 2790 10-50 06.05.1896 2470 10-50 080.41897 577 1.5 02.0.81897 2400 5-10 09.04.1900 21	08.04.1865	2370	10-50	1865	-	-	10.04.1865	3390*	10-50
05/1872 3300 50 05/1872 - - 05/1872 2040* 1.5 19.02.1876 2674 10-50 1876 - - 20.02.1876 20.0* 100 1402.1877 1219 1.5 1881 - - 13.03.1881 2480 5-10 29.12.1882 2260 10 04.01.1883 510 1.5 03.01.1888 2670 10 23.03.1886 1820 5-10 15.03.1888 563 1.5 13.03.1888 2600 10 04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.09.1890 4400 100-200 07.03.1891 1540 1-5 09.03.1891 1090 10-50 88.03.1891 2400 5-10 06.05.1896 2470 10-50 08.05.1896 456 1 06.05.1896 2950 10-50 05.01.1920 100 13.10.1915 513 1-5 10.04.1900 3600 10-50	29.01.1867	2160	10	1867	-	-	31.01.1867	2840*	10-50
19.02.1876 2674 10-50 1876 - - 20.02.1876 4210* 100 14.02.1877 1219 1-5 1877 - - 15.00.1877 2080 1-5 08.03.1881 1708 5 1881 - - 13.03.1883 2480 5-10 23.03.1886 2002 5-10 03.04.1886 425 1 24.03.1886 2790 10-50 12.03.1888 1820 5-10 15.03.1888 563 1-5 13.03.1888 2600 10 04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.05.1896 2400 5-10 26.03.1895 2090 5-10 02.48.1895 577 1-5 28.03.1891 2400 5-10 04.04.1897 577 1-5 02.08.1897 2400 5-10 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 1909 - - 05.01.1902 16.01.1920	05/1872	3300	50	05/1872	-	-	05/1872	2040*	1-5
14.02.1877 1219 1-5 1877 - - 15.02.1877 2080 1-5 08.03.1881 1708 5 1881 - - 13.03.1881 2480 5-10 29.12.1882 2260 10 04.01.1883 510 1-5 03.01.883 2670 10 23.03.1886 2002 5-10 05.01.1884 663 1-5 13.03.1888 2670 10 04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.09.1891 2400 5-10 02.03.1891 1540 1-5 09.03.1891 1900 10-50 08.03.1891 2400 5-10 06.05.1896 2470 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 10.04.1900 3600 10-50 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 10.01.1915 2320	19.02.1876	2674	10-50	1876	-	-	20.02.1876	4210*	100
08.03.1881 1708 5 1881 - - 13.03.1881 2480 5-10 29.12.1882 2260 10 04.01.1883 510 1-5 03.01.1883 2670 10 23.03.1886 1820 5-10 15.03.1888 563 1-5 13.03.1888 2670 10 04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.09.1890 4400 100-200 07.03.1891 1540 1-5 09.03.1891 1000 10-50 08.05.1896 2400 5-10 26.03.1895 2909 5-10 04.08.1897 577 1-5 02.08.1897 2400 5-10 05.02.1909 2170 10 10.40.2.1909 534 1-5 10.04.190 3600 10-50 05.02.1902 100 13.10.1915 513 1-5 10.10.1915 2320 5-10 05.02.1923 10.50 16.01.1920 4400 100-192 50 50 05.02.1923 <td>14.02.1877</td> <td>1219</td> <td>1-5</td> <td>1877</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>15.02.1877</td> <td>2080</td> <td>1-5</td>	14.02.1877	1219	1-5	1877	-	-	15.02.1877	2080	1-5
29.12.1882 2260 10 04.01.1883 510 1-5 03.01.1883 2670 10 23.03.1886 2002 5-10 03.04.1886 425 1 24.03.1886 2790 10.50 12.03.1888 1820 5-10 15.03.1888 563 1-5 13.03.1888 2600 10 04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.05.1890 4400 100-200 07.03.1891 1540 1-5 09.03.1891 1090 10-50 08.03.1895 2790 10-50 06.05.1896 2470 10-50 080.5.1896 456 1 06.05.1896 2950 10-50 09.04.1900 2770 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 1909 - - 08.10.1912 2290 10 13.10.1915 513 1-5 10.01.1912 230 <td>08.03.1881</td> <td>1708</td> <td>5</td> <td>1881</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>13.03.1881</td> <td>2480</td> <td>5-10</td>	08.03.1881	1708	5	1881	-	-	13.03.1881	2480	5-10
23.03.1886 2002 5-10 03.04.1886 425 1 24.03.1886 2790 10-50 12.03.1888 1820 5-10 15.03.1888 563 1-5 13.03.1888 2600 10 04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.09.1890 4400 100-200 07.03.1891 1540 1-5 09.03.1891 1090 10-50 08.03.1891 2400 5-10 06.05.1896 2470 10-50 08.05.1896 456 1 06.05.1896 2400 5-10 06.05.1896 2470 10-50 08.04.1897 577 1-5 02.08.1897 2400 5-10 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 19.04.1917 2250 5 05.02.1909 2170 10 13.01.915 513 1-5 10.04.1917 2250 5 15.01.1920 2503 10-50 14.01<100	29.12.1882	2260	10	04.01.1883	510	1-5	03.01.1883	2670	10
12.03.1888 1820 5-10 15.03.1888 563 1-5 13.03.1888 2600 10 04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.09.1890 4400 100-200 07.03.1891 1540 1-5 09.03.1891 1090 10-50 08.03.1895 2790 10-50 06.05.1896 2470 10-50 080.5.1896 456 1 06.05.1896 2950 10-50 09.04.1900 2770 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1903 300 10-50 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 10.01.1915 2320 5-10 17.04.1917 1762 5 20.04.1917 868 10 19.04.1917 2250 5 15.01.1920 2503 10-50 16.01.1920 1410 100 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 14.02.1940 832 5-10 15.03.1940	23.03.1886	2002	5-10	03.04.1886	425	1	24.03.1886	2790	10-50
04.09.1890 3975 100 07.09.1890 469 1 06.09.1890 4400 100-200 07.03.1891 1540 1-5 09.03.1891 1090 10-50 08.03.1891 2400 5-10 26.03.1895 2090 5-10 02.04.1895 572 1-5 28.03.1895 2950 10-50 06.05.1896 2470 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 09.04.1900 2770 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 10.04.1917 2220 5 05.01.1902 2503 10-50 16.01.1920 1410 100 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 04.02.1923 780 5-10 05.02.1926 2490 5-10 15.03.1940 3245 50 15.03.1940 832 5-10 10.02.1946	12.03.1888	1820	5-10	15.03.1888	563	1-5	13.03.1888	2600	10
07.03.1891 1540 1-5 09.03.1891 1090 10-50 08.03.1891 2400 5-10 26.03.1895 2090 5-10 02.04.1895 572 1-5 28.03.1895 2790 10-50 06.05.1886 2470 10-50 0805.1896 456 1 06.05.1896 2950 10-50 09.04.1900 2770 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 10.10.1915 2320 5-10 17.04.1917 1762 5 20.04.1917 868 10 19.04.1917 2505 5 15.01.1920 2503 10-50 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 04.02.192 780 5-10 16.03.1940 3650 10-50 10.01.916 1532 5 20.06.1926 1170 10-50 10.04.1941 2910 10-50	04.09.1890	3975	100	07.09.1890	469	1	06.09.1890	4400	100-200
26.03.1895 2090 5-10 02.04.1895 572 1-5 28.03.1895 2790 10-50 06.05.1896 2470 10-50 080.5.1896 456 1 06.05.1896 2950 10-50 317.1897 2070 5-10 04.08.1897 577 1-5 02.08.1897 2400 5-10 09.04.1900 2770 10-50 09.04.1909 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 05.02.1909 2170 10 13.10.1915 513 1-5 10.10.1915 2320 5-10 08.10.1915 2290 10 13.10.1915 513 1-5 10.01.1915 2320 5-10 17.04.1917 1762 5 20.04.1917 868 10 19.04.1917 2250 5 15.01.1920 1503 140.21923 780 5-10 05.06.1926 2900 5-10 17.06.1926 1652 5 0.06.1926 1170 10-50 10.06.1926 2900	07.03.1891	1540	1-5	09.03.1891	1090	10-50	08.03.1891	2400	5-10
060.51.1896 2470 10-50 080.5.1896 456 1 06.05.1896 2950 10-50 317.1897 2070 5-10 04.08.1897 577 1-5 02.08.1897 2400 5-10 09.04.1900 2770 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 1909 - - 08.10.1915 2230 10 13.10.1915 513 1-5 10.10.1915 2320 510 17.04.1917 1762 5 20.04.1917 868 10 19.04.1917 2250 5 15.01.1920 2503 10-50 16.01.1920 1410 100 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 12.03.1940 832 5-10 16.03.1940 3560 10-50 10.02.1946 1028 1-5 12.03.1941 975 10-50 10.04.1941 2910 <td>26.03.1895</td> <td>2090</td> <td>5-10</td> <td>02.04.1895</td> <td>572</td> <td>1-5</td> <td>28.03.1895</td> <td>2790</td> <td>10-50</td>	26.03.1895	2090	5-10	02.04.1895	572	1-5	28.03.1895	2790	10-50
31.7.1897 2070 5-10 04.08.1897 577 1-5 02.08.1897 2400 5-10 09.04.1900 2770 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 0s.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 19.09 - - 08.10.1915 2500 10 13.10.1915 513 1-5 10.10.1915 2320 5-10 17.04.1917 1762 5 20.04.1917 868 10 19.04.1917 2250 5 15.01.1920 2503 10-50 16.01.1920 1410 100 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 04.02.1923 780 5-10 16.03.1940 3560 10-50 15.03.1940 3245 50 15.03.1940 832 5-10 16.03.1940 3560 10-50 10.02.1946 1028 1-5 12.02.1946 872 10 11.02.1946 2280	06.05.1896	2470	10-50	080.5.1896	456	1	06.05.1896	2950	10-50
09.04.1900 2770 10-50 09.04.1900 518 1-5 10.04.1900 3600 10-50 05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 1909 - - 08.10.1915 2290 10 13.10.1915 513 1-5 10.10.1915 2320 5-10 17.04.1917 1762 5 20.04.1917 868 10 19.04.1917 2250 5 15.01.1920 2503 10-50 16.01.1920 1410 100 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 04.02.1923 780 5-10 05.02.1923 2700 10 17.06.1926 1652 5 20.06.1926 1170 10-50 21.06.1926 2490 5-10 15.03.1940 3245 50 15.03.1940 832 5-10 10.04.1941 2910 10-50 10.02.1946 1028 1-5 12.03.1947 635 1-5 17.03.1947 2550	31.7.1897	2070	5-10	04.08.1897	577	1-5	02.08.1897	2400	5-10
05.02.1909 2170 10 14.02.1909 534 1-5 1909 - - 08.10.1915 2290 10 13.10.1915 513 1-5 10.10.1915 2320 5-10 17.04.1917 1762 5 20.04.1917 868 10 19.04.1917 2250 5 15.01.1920 2503 10-50 16.01.1920 1410 100 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 04.02.1923 780 5-10 05.02.1923 2700 10 17.06.1926 1652 5 20.06.1926 1170 10-50 21.06.1926 2490 5-10 15.03.1940 3245 50 15.03.1940 832 5-10 10.04.1941 2910 10-50 100.21946 1028 1-5 12.02.1946 872 10 11.02.1946 2280 5 15.03.1947 2272 10 22.03.1947 635 1-5 17.03.1947 2550 <t< td=""><td>09.04.1900</td><td>2770</td><td>10-50</td><td>09.04.1900</td><td>518</td><td>1-5</td><td>10.04.1900</td><td>3600</td><td>10-50</td></t<>	09.04.1900	2770	10-50	09.04.1900	518	1-5	10.04.1900	3600	10-50
08.10.1915 2290 10 13.10.1915 513 1-5 10.10.1915 2320 5-10 17.04.1917 1762 5 20.04.1917 868 10 19.04.1917 2250 5 15.01.1920 2503 10-50 16.01.1920 1410 100 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 04.02.1923 780 5-10 05.02.1923 2700 10 17.06.1926 1652 5 20.06.1926 1170 10-50 21.06.1926 2490 5-10 15.03.1940 3245 50 15.03.1940 832 5-10 16.03.1940 3560 10-50 0.04.1941 2050 5-10 12.03.1941 975 10-50 10.04.1941 2910 10-50 10.02.1946 1282 10 11.02.1946 2880 5 5 10.07.1954 2265 10 19.07.1954 259 <1	05.02.1909	2170	10	14.02.1909	534	1-5	1909	-	-
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	08.10.1915	2290	10	13.10.1915	513	1-5	10.10.1915	2320	5-10
15.01.1920 2503 10-50 16.01.1920 1410 100 16.01.1920 3650 50 05.02.1923 1852 5-10 04.02.1923 780 5-10 05.02.1923 2700 10 17.06.1926 1652 5 20.06.1926 1170 10-50 21.06.1926 2490 5-10 15.03.1940 3245 50 15.03.1940 832 5-10 16.03.1940 3560 10-50 08.04.1941 2050 5-10 12.03.1941 975 10-50 10.04.1941 2910 10-50 10.02.1946 1028 1-5 12.02.1946 872 10 11.02.1946 2280 5 15.03.1947 2272 10 22.03.1947 635 1-5 17.03.1947 2550 5-10 10.07.1954 2265 10 19.07.1954 259 <1	17.04.1917	1762	5	20.04.1917	868	10	19.04.1917	2250	5
05.02.1923 1852 5-10 04.02.1923 780 5-10 05.02.1923 2700 10 17.06.1926 1652 5 20.06.1926 1170 10-50 21.06.1926 2490 5-10 15.03.1940 3245 50 15.03.1940 832 5-10 16.03.1940 3560 10-50 08.04.1941 2050 5-10 12.03.1941 975 10-50 10.04.1941 2910 10-50 10.02.1946 1028 1-5 12.02.1946 872 10 11.02.1946 2280 5 15.03.1947 2272 10 22.03.1947 635 1-5 17.03.1947 2550 5-10 10.07.1954 2265 10 19.07.1954 259 <1	15.01.1920	2503	10-50	16.01.1920	1410	100	16.01.1920	3650	50
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	05.02.1923	1852	5-10	04.02.1923	780	5-10	05.02.1923	2700	10
15.03.1940 3245 50 $15.03.1940$ 832 $5-10$ $16.03.1940$ 3560 $10-50$ $08.04.1941$ 2050 $5-10$ $12.03.1941$ 975 $10-50$ $10.04.1941$ 2910 $10-50$ $10.02.1946$ 1028 $1-5$ $12.02.1946$ 872 10 $11.02.1946$ 2280 5 $15.03.1947$ 2272 10 $22.03.1947$ 635 $1-5$ $17.03.1947$ 2250 $5-10$ $10.07.1954$ 2265 10 $19.07.1954$ 229 <1 $11.07.1954$ 2410 $5-10$ $13.03.1981$ 652 1 $14.03.1981$ 1140 $10-50$ $15.03.1981$ 2190 5 $21.07.1981$ 1730 5 $22.07.1981$ 718 5 $22.07.1981$ 2310 $5-10$ $28.03.1988$ 1260 $1-5$ $29.03.1988$ 706 5 $29.03.1988$ 2380 $5-10$ $14.08.2002$ 5160 >200 $15.08.2002$ 529 $1-5$ $16.01.2001$ <td< td=""><td>17.06.1926</td><td>1652</td><td>5</td><td>20.06.1926</td><td>1170</td><td>10-50</td><td>21.06.1926</td><td>2490</td><td>5-10</td></td<>	17.06.1926	1652	5	20.06.1926	1170	10-50	21.06.1926	2490	5-10
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15.03.1940	3245	50	15.03.1940	832	5-10	16.03.1940	3560	10-50
10.02.1946 1028 1-5 12.02.1946 872 10 11.02.1946 2280 5 15.03.1947 2272 10 22.03.1947 635 1-5 17.03.1947 2550 5-10 10.07.1954 2265 10 19.07.1954 259 <1	08.04.1941	2050	5-10	12.03.1941	975	10-50	10.04.1941	2910	10-50
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	10.02.1946	1028	1-5	12.02.1946	872	10	11.02.1946	2280	5
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15.03.1947	2272	10	22.03.1947	635	1-5	17.03.1947	2550	5-10
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	10.07.1954	2265	10	19.07.1954	259	<1	11.07.1954	2410	5-10
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	13.03.1981	652	1	14.03.1981	1140	10-50	15.03.1981	2190	5
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	21.07.1981	1730	5	22.07.1981	718	5	22.07.1981	2310	5-10
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	28.03.1988	1260	1-5	29.03.1988	706	5	29.03.1988	2380	5-10
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	14.08.2002	5160	>200	15.08.2002	529	1-5	16.08.2002	4700	100-200
02.04.2006 1430 1-5 3./4.4.2006 1020** 10-50 03.04.2006 2540 5-10 15.01.2011 1010 1-5 16.01.2011 645** 1-5 17.01.2011 1900 1-5 04.06.2013 3040 20-50 04.06.2013 744** 5 05.06.2013 3630 20-50 statistische Abflüsse (www.hydro.chmi.cz, Stand: 08.08.2017) 143 MQ 103 MQ 296 MQ 143 MQ 103 MQ 296 MQ 855 HQ1 441 HQ1 1240 HQ1 1770 HQ5 754 HQ5 2220 HQ5 2230 HQ10 895 HQ10 2670 HQ10 3440 HQ50 1230 HQ50 3780 HQ50 4020 HQ100 1390 HQ100 4290 HQ100	06.01.2003	1030	1-5	06.01.2003	772	5	06.01.2003	1945	1-5
15.01.2011 1010 1-5 16.01.2011 645** 1-5 17.01.2011 1900 1-5 04.06.2013 3040 20-50 04.06.2013 744** 5 05.06.2013 3630 20-50 statistische Abflüsse (www.hydro.chmi.cz, Stand: 08.08.2017) 143 MQ 103 MQ 296 MQ 855 HQ1 441 HQ1 1240 HQ1 1770 HQ5 754 HQ5 2220 HQ5 2230 HQ10 895 HQ10 2670 HQ10 3440 HQ50 1230 HQ50 3780 HQ50 4020 HQ100 1390 HQ100 4290 HQ100	02.04.2006	1430	1-5	3./4.4.2006	1020**	10-50	03.04.2006	2540	5-10
04.06.2013 3040 20-50 04.06.2013 744** 5 05.06.2013 3630 20-50 statistische Abflüsse (www.hydro.chmi.cz, Stand: 08.08.2017) 143 MQ 103 MQ 296 MQ 855 HQ1 441 HQ1 1240 HQ1 1770 HQ5 754 HQ5 2220 HQ5 2230 HQ10 895 HQ10 2670 HQ10 3440 HQ50 1230 HQ50 3780 HQ50 4020 HQ100 1390 HQ100 4290 HQ100	15.01.2011	1010	1-5	16.01.2011	645**	1-5	17.01.2011	1900	1-5
statistische Abflüsse (www.hydro.chmi.cz, Stand: 08.08.2017) 143 MQ 103 MQ 296 MQ 855 HQ1 441 HQ1 1240 HQ1 1770 HQ5 754 HQ5 2220 HQ5 2230 HQ10 895 HQ10 2670 HQ10 3440 HQ50 1230 HQ50 3780 HQ50 4020 HQ100 1390 HQ100 4290 HQ100	04.06.2013	3040	20-50	04.06.2013	744**	5	05.06.2013	3630	20-50
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$				stati	stische Ab	llüsse (www.h	ydro.chmi.c	z, Stand: 08	.08.2017)
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		143	MQ		103	MQ		296	MQ
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		855	HQ ₁		441	HQ ₁		1240	HQ ₁
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		1770	HQ ₅		754	HQ ₅		2220	HQ ₅
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		2230	HO ₁₀		895	HO ₁₀		2670	HO ₁₀
4020 HO100 1390 HO100 4290 HO100		3440	HOro		1230	HOro		3780	HOso
		4020	HQ100		1390	HO		4290	HO100

(* Werte des Pegels Děčín; ** Werte des Pegels Kostelec; - Daten nicht verfügbar)

Historische und auch jüngere Pegelaufzeichnungen zeigen, dass vor allem höhere Abflüsse der Moldau in Prag nicht zwangsläufig in einem proportionalen Verhältnis zu den Abflüssen der Elbe - unterhalb der Moldaumündung - in Děčín oder in Ústí n. L. stehen müssen. Beispiele hierfür sind die Hochwasser der Jahre 1872 und 2002. Beim Hochwasser im Mai 1872 betrug der Scheitelabfluss in Prag 3.300 m³/s, in Děčín jedoch nur 2.040 m³/s (ELLEDER 2010, vgl. Tab. 2-1). Im August 2002 wurden in Prag im Scheitel des Hochwassers 5.160 m³/s registriert, aber in Děčín nur 4.770 m³/s (IKSE 2014). Nicht nur unterschiedliche Hochwassergenesen im Elbe- und Moldaugebiet, sondern auch die lokale Überschwemmungssituation an den Mündungen von Nebenflüssen tragen hierzu bei. Die zwei bedeutendsten Flächen an der Elbe finden sich an den Mündungen von Moldau und Eger. Die Retention in diesen beiden großflächigen Überschwemmungsgebieten kann hier in Abhängigkeit von den Genesen eine deutliche Dämpfung der Scheitelabflüsse und Abflachungen in den Hochwasserganglinien hervorrufen. Hiervon sind ereignisabhängig auch die durch den Talsperrenbetrieb an der Moldau erzielten Scheitelabflussminderungen betroffen, die elbabwärts als Sekundäreffekt der Talsperrensteuerung Einbußen in den Wirkungen erfahren (vgl. BFG 2012, BALVÍN ET AL. 2017) können.

Die Daten wichtiger historischer Hochwasser seit 1845 werden für ausgewählte Pegel in Tabelle 2-1 dargestellt. Zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit finden sich dort ebenfalls Angaben zu den wichtigsten statistischen Haupt- und Extremwerten zwischen MQ und HQ_{100} .

2.2 Der deutsche Teil des Einzugsgebiets der Elbe

Unterhalb der tschechisch-deutschen Grenze fließt die Elbe auf einer Länge von 723 km durch Deutschland und entwässert dabei das in zehn Bundesländern gelegene deutsche Einzugsgebiet mit einer Fläche von 97.135 km². Abbildung 2-6 veranschaulicht die Entwicklung des oberirdischen Einzugsgebiets von der tschechisch-deutschen Grenze bis zum Pegel Neu Darchau. Zur Orientierung sind dort auch die wichtigsten Zuflüsse und Pegel der Elbe entsprechend ihrer Lage am Gewässer aufgeführt.

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass sich auf der deutschen Strecke durch die Mündungen der Schwarzen Elster (A_{Eo} = 5.705 km²), der Mulde (A_{Eo} = 7.400 km²), der Saale (A_{Eo} = 24.079 km²) und der Havel (A_{Eo} = 23.858 km²) das Einzugsgebiet jeweils sprunghaft vergrößert. Allein diese vier Nebenflüsse entwässern bereits ca. 75 % des gesamten deutschen Einzugsgebiets bis zum Wehr Geesthacht (Elbe-km 585,9).



Abbildung 2-6: Entwicklung des oberirdischen Einzugsgebiets der Elbe unterhalb der tschechischdeutschen Grenze unter Berücksichtigung der wichtigsten Nebenflüsse und Pegel

Vergleichbar mit der hydrologischen Situation in Tschechien ist auch im deutschen Streckenabschnitt der Elbe den mittleren monatlichen Abflüssen an den gewässerkundlichen Pegeln ein markanter Jahresgang aufgeprägt. In Abbildung 2-7 sind die aus der monatlichen Statistik abgeleiteten mittleren Jahresabflussganglinien für den mittleren Abfluss (MQ) und den mittleren Hochwasserabfluss (MHQ) für die Pegel Barby und Wittenberge (Zeitraum 1900-2013) bzw. für den Pegel Dresden (Zeitraum 1931-2013) dargestellt. Die hier zu erkennende jahreszeitlich unausgeglichene Wasserführung mit erhöhten Abflüssen im Winterhalbjahr und lang anhaltenden Niedrigwasserperioden im Sommer und Herbst ist ein typisches Merkmal für Gewässer mit Mittelgebirgscharakter.

Die tschechischen Hochwasserentstehungsgebiete der Elbe liegen vollständig im Mittelgebirgsraum, vor allem im Riesengebirge und Böhmerwald (Kap. 2.1). Auch in Deutschland ist das Abflussverhalten der Elbe bei Hochwasser im Wesentlichen durch Mittelgebirgsregionen wie dem Erzgebirge, dem Thüringer Wald oder dem Harz bestimmt. Aufgrund ihres Abflussregimes zählt die Elbe auch in Deutschland zu den Strömen des Regen-Schnee-Typs (IKSE 2005), der vorwiegend durch Winter- und Frühjahrshochwasser geprägt wird (Abb. 2-7). Hochwasser dieses Typs ereigneten sich in jüngerer Zeit im April 2006 und im Januar 2011 (Kap. 2.3). Die jahreszeitliche Verteilung der Elbehochwasser am Pegel Dresden von 1890 bis 2013 weist 71 % der Hochwasserereignisse als Winterhochwasser aus (Abb. 2-8). Dies korrespondiert somit sehr gut mit den Aussagen, die für den Pegel Děčín über die Verteilung von Sommer- und Winterhochwassern getroffen wurde (Abb. 2-4). Das beschriebene Regime wird durch die großen, stromab mündenden deutschen Zuflüsse nur noch unmerklich verändert.



Abbildung 2-7: Mittlere Jahresabflussganglinien für Dresden, Barby und Wittenberge (DGJ 2013)



Abbildung 2-8: Jährliche Hochwasserscheitelabflüsse am Pegel Dresden (Jahresreihe 1890-2013, farbliche Unterteilung in Sommer (rot)- und Winterereignisse (blau), HQ_T-Werte gemäß BFG 2009)

> Eine Auswertung von Hochwasserereignissen am Pegel Barby (unterhalb der Saalemündung), die einen Wasserstand von 600 cm übersteigen, zeigt für den Zeitraum von 1895 bis 1994, dass 86 % der Hochwasser ebenfalls im Winter oder Frühjahr aufgetreten sind. Sommerereignisse werden zwar seltener im Elbegebiet registriert, können aber dennoch eine große Bedeutung erlangen, wie das durch eine Vb-Wetterlage ausgelöste Hochwasser vom August 2002 und das Extremereignis vom Juni 2013 beweisen (IKSE 2004, BFG 2014).

> Elbehochwasser können, abhängig von der Witterung und der erforderlichen Abflussbereitschaft der Böden im Einzugsgebiet, gleichermaßen im Winter- und Sommerhalbjahr auftreten. Die verschiedenen Hochwassergenesen im Elbegebiet verursachen jedoch im Allgemeinen sehr unterschiedliche Wellenabläufe entlang der deutschen Elbestrecke, die kurz (1-2 Wochen) bis sehr lang andauernde Wellenscheitel (4 Wochen) mit ganz unterschiedlichen Abflussfüllen aufweisen (vgl. Tab. 5-1 und Abbildungen in Anlage 2). Während Letztere hauptsächlich im Winter stattfinden, dominieren die steilansteigenden kurzen Wellen die Sommerereignisse. In Abbildung 2-9 sind die aus unterschiedlichen Hochwassergenesen hervorgegangenen Wellenformen an der Elbe exemplarisch für die Pegel Dresden und Wittenberge abgebildet.



Abbildung 2-9: Abflussganglinien der Hochwasser 1988, 2002, 2006 u. 2013 an den Pegeln Dresden und Wittenberge; Zeitachse normiert - alle Hochwasser mit identischem Scheitelzeitpunkt in Dresden

Diese ausgewählten Hochwasser stehen stellvertretend für Elbewellen mit kurzen Scheiteln (2002 und 2013), mittellangen Scheiteln (2006) und sehr langen Scheiteln (1988). Beim

Hochwasser 2002 konnte durch die gezielte Flutung der Havelniederung und der Havelpolder ein deutlicher Effekt zur Kappung des Elbescheitels am Pegel Wittenberge erreicht werden. Im Fall des Hochwassers 2013 sind am Pegel Wittenberge im Scheitel die Auswirkungen der Deichbrüche in Fischbeck und die Flutung der Havelniederung und -polder ebenfalls feststellbar. Anhand der dargestellten Ganglinien ist zu erkennen, dass sich die Hochwasser 2002/2013 und 2006 nicht nur in der Wellensteilheit in Dresden, sondern noch deutlicher in der Wellenlänge in Wittenberge unterscheiden. In Abhängigkeit von ihren Genesen führen Retentionseffekte zu unterschiedlichen Wellenabflachungen mit einhergehenden Scheitelabflussreduzierungen, die bis zu 500 m³/s entlang der Elbe zwischen Dresden und Wittenberge betragen können (vgl. auch Tab. 2-2).

In Tabelle 2-2 sind die Haupt- und Extremwerte des Abflusses zwischen dem mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) und dem 500-jährlichen Hochwasser (HQ₅₀₀) für die wichtigsten gewässerkundlichen Pegel an der Elbe zwischen Schöna und Zollenspieker, entnommen aus BFG (2009), zusammengestellt.

Pegel	Schöna	Dresden	Torgau	Barby	Wittenberge	Neu Darchau	Zollenspieker
Elbe-km	2,1	55,6	154,2	294,8	453,9	536,4	598,3
Abfluss	[m³/s]	[<i>m³/s</i>]					
MNQ	109	112	121	223	298	290	289
MQ	313	327	337	558	701	710	708
MHQ	1542	1534	1498	1950	1890	1830	1804
HQ ₂	1721	1580	1540	2270	2190	2130	2106
HQ ₅	2310	2110	2090	2970	2810	2740	2712
HQ ₁₀	2769	2520	2510	3410	3200	3110	3080
HQ ₂₀	3250	3000	3000	3850	3590	3500	3466
HQ ₅₀	3900	3690	3680	4360	4220	4130	4084
HQ ₁₀₀	4415	4260	4230	4710	4545	4450	4360
HQ ₂₀₀	4960	4860	4800	5040	4860	4760	4700
HQ ₃₀₀	5320	5240	5150	5220	5030	4940	4880
HQ ₅₀₀	5800	5740	5600	5440	5230	5140	5080

Tabelle 2-2: Haupt- und Extremwerte des Abflusses für Pegel der Elbe in Deutschland (BFG 2009,Bezugsperiode 1890-2006)

Die großräumige Hochwassergenese entscheidet im Ereignisfall als maßgebender Faktor, ob Rückhaltungen in den Talsperren an der Moldau, Eger und oberen Saale überregional absenkende Wirkungen entlang der deutschen Binnenelbe auf Hochwasserscheitel entfalten können. Zwar ist das oberirdische Einzugsgebiet der Elbe in Deutschland ca. doppelt so groß wie das der Elbe in Tschechien, jedoch vermochten die Abflüsse der deutschen Regionen bei großen Elbehochwassern die an der oberen Elbe (D/CZ-Grenze) angelegten Hochwasserereignisse in der Vergangenheit im Wellenablauf zwar zu modifizieren (insbesondere infolge der Mulde- und Saalemündung zu erhöhen), aber nicht mehr grundlegend zu ändern. Dies wäre der Fall, wenn ein bedeutsamer Zufluss in Deutschland mit seiner Welle einen neuen

> Hochwasserscheitel (verbunden mit einer grundsätzlich veränderten Wellenform) der Elbe aufprägen würde. Die in Abbildung 2-9 dargestellten zeitlichen Abläufe der Hochwasser von 1988, 2002, 2006 und 2013 zeigen beispielhaft, dass die am Pegel Dresden beobachteten Hochwasser und Hochwasserscheitel trotz überlagerter Abflüsse mündender großer Zuflüsse der Mittelelbe auch den Wellenablauf bis zum Pegel Wittenberge dominieren. Im Wesentlichen verursachen die Hochwasserwellen der Zuflüsse eine Verbreiterung der Wellen in der Elbe mit größeren Abflussfüllen.

> Wenn Rückhaltungen in tschechischen Talsperren im Hochwasserscheitelbereich in Dresden wasserstandsmindernd wirken, dann ist dementsprechend mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten, dass die zurückgehaltenen Volumina überall entlang der deutschen Binnenelbe in Abhängigkeit von der großräumigen Retention und der lokalen Durchflusssituation die Hochwasserscheitel beeinflussen und reduzieren (vgl. Abb. 1-1). Diese von der Hochwassergenese begünstigte Effizienz der Talsperren stellt eine Besonderheit des Elbegebiets dar und ist für die Elbanlieger von großer Bedeutung. In entsprechender Form sind überregionale positive Rückhaltewirkungen im Rhein- und Donaugebiet in der Regel so nicht zu erwarten, da hier die typischen Hochwassergenesen die überlagerten Wirkungen von Maßnahmen nicht oder nur bedingt im Scheitelbereich stromabwärts transportieren, sondern häufig im ansteigenden bzw. abfallenden Ast der Hochwasserwellen (BfG 2014).

2.3 Genesen charakteristischer Hochwasser im Elbe-Einzugsgebiet

Die verschiedenen charakteristischen Eigenschaften, die in den beiden vorangehenden Kapiteln aufgezeigt wurden, konnten in der jüngeren Vergangenheit an der Oberen und Mittleren Elbe bei den Hochwassern im August 2002, April 2006, Januar 2011 und Juni 2013 beobachtet werden. Wegen ihrer (nicht nur hydrologisch) großen Bedeutung, sollen sie hinsichtlich ihrer meteorologischen Entstehungsgeschichte und kennzeichnender hydrologischer Merkmale kurz beschrieben werden. Die vier Ereignisse wurden durch sehr unterschiedliche hydrologische Entstehungsprozesse ausgelöst. Aufgrund der Regionalität in den ereignisspezifischen Hochwassergenesen besitzen die Scheitelwasserstände, wie im Rheingebiet auch, entlang der Elbe nicht überall eine gleichwertige hydrologisch-statistische Bedeutung. Die Abbildungen 2-11 bis 2-13 und 2-15 veranschaulichen für diese Ereignisse die heterogenen Abflussverhältnisse in der Elbe und ihren größten Nebenflüssen. Darüber hinaus enthält Tabelle 2-3 eine Zusammenfassung der eingetretenen Scheitelabflüsse an regional bedeutsamen Pegeln an der Elbe und in ihrem Einzugsgebiet. Aus ihr wird ersichtlich, dass bei den vier aufgeführten Hochwassern ganz unterschiedliche Entwicklungen der Scheitelabflüsse entlang der Elbe, beispielsweise an der unteren Mittelelbe zwischen Tangermünde bzw. Wittenberge und Neu Darchau, zu verzeichnen waren.
Tabelle 2-3: Scheitelabflüsse der Hochwasser 2002, 2006, 2011 und 2013 an den Pegeln der Elbe und den wichtigen Nebenflüssen in Tschechien und Deutschland (*tschechische Elbestationierung, ggf. der Nebenflussmündung; **entsprechend der deutschen Elbestationierung; ***Orginalwerte nach Kappung des Elbescheitels durch Flutung der Havelniederung) (Quelle: WISKI-DB der BfG, vgl. Anlage 2)

Pegel	Gewässer	Elbe-km / Mündung bei Elbe-km	August 2002	April 2006	Januar 2011	Juni 2013
			[<i>m³/s</i>]	[<i>m³/s</i>]	[m³/s]	[m³/s]
Kostelec/Brandys n.L.	Elbe	865,2*	507	1020	610	744
Prag-Chuchle	Moldau	837,2*	5160	1430	1010	3040
Louny	Eger	792,3*	175	250	345	331
Ústi nad Labem	Elbe	765,9* /-39,3 **	4700	2540	1900	3620
Dresden	Elbe	55,6	4580	2870	2280	3940
Torgau	Elbe	154,2	4420	2880	2270	4080
Bad Düben	Mulde	259,6	2270	614	850	1770
Aken	Elbe	274,7	4020	3180	2820	4580
Calbe-Grizehne	Saale	17,43	295	483	723	1020
Barby	Elbe	294,8	4290	3590	3600	5230
Tangermünde	Elbe	388,2	3840	3560	3660	5140
Rathenow	Havel	103,9	156	170	248	163
Wittenberge	Elbe	453,9	3830***	3710	3770	4330***
Neu Darchau	Elbe	536.4	3430***	3600	3600	4080***

2.3.1 Das Hochwasser vom August 2002

Das extreme Sommerhochwasser vom **August 2002** (BFG 2002, IKSE 2004) wurde durch intensive Starkregenereignisse im tschechischen und teilweise auch im deutschen Einzugsgebiet ausgelöst. Es verursachte das zu diesem Zeitpunkt größte Hochwasser in Tschechien und Deutschland seit 1890. Dabei wurde die langjährige monatliche Niederschlagshöhe im Elbegebiet bereits innerhalb der ersten 10 Tage des Monats erreicht. Abbildung 2-10 zeigt die regionale Verteilung der Niederschlagssummen in Tschechien für die Periode zwischen dem 6. und 15. August 2002. Zwei Niederschlagsphasen und Hochwasserwellen prägten die meteorologische Situation, wobei innerhalb der ersten Phase eine intensive Sättigung der Böden im Einzugsgebiet auftrat, die in der zweiten zu einem erhöhten Oberflächenabfluss führte.



Abbildung 2-10: Regionale Verteilung der Niederschlagssummen in Tschechien für den Zeitraum zwischen 6.8.2002 und 15.8.2002 (MŽP 2003)

Die höchsten Abflüsse in Tschechien wurden in der Moldau und in kleineren Nebenflüssen der Eger gemessen (BFG 2002). Die erste Welle des Hochwassers wurde dabei maßgeblich durch den Einsatz der oberhalb von Prag errichteten Moldaukaskade beeinflusst, welche einen bedeutenden Teil der Hochwasserwelle durch Füllung des freien Talsperrenraums zurückhalten konnte. Folglich war bei Auftreten der zweiten Hochwasserwelle der verfügbare Speicherraum im Vergleich zur ersten Welle wesentlich kleiner, so dass nur noch die beiden Talsperren Lipno I und Orlík zur Dämpfung der Hochwasserwelle beitragen konnten. Dabei wurde in der Talsperre Orlík sogar das höchste Stauziel überschritten (Kap. 2.4.2).

Die statistische Auswertung im Anschluss an das Hochwasser 2002 in Tschechien machte deutlich, dass das Ereignis in Prag einer Jährlichkeit von 500 Jahren entspricht, wenn das Hochwasserereignis selbst nicht im Bezugszeitraum der statistischen Reihe (bis 2001) berücksichtigt wird. Unter Einbeziehung des Hochwassers 2002 ergab sich bei der Ermittlung der Extremwerte immer noch ein 200-jährliches Hochwasser. Der Scheitelabfluss in Prag (Abb. 2-11) betrug 5.160 m³/s. Dies entspricht dort dem höchsten jemals gemessenen Abfluss. Aufgrund von weitläufigen Ausuferungen des Hochwassers in Überflutungsflächen am Zusammenfluss der Elbe mit der Moldau bzw. der Eger, erfolgte eine Scheitelabflachung zwischen Prag und Ustí n. L., so dass dort nur noch ein Abfluss von 4.700 m³/s als Scheitelwert gemessen wurde (vgl. Tab. 2-3).



Abbildung 2-11: Gemessene Abflussganglinien während des Hochwassers im August 2002

In Deutschland beeinflussten kleinere Nebenflüsse aus dem Osterzgebirge sowie das extreme Hochwasser in der Mulde, welches am Pegel Priorau einen Scheitelabfluss von annähernd 1.000 m³/s erreichte, die Hochwasserentwicklung in der Elbe maßgeblich. An der Saale war kein Hochwasser zu verzeichnen. Sowohl der kontrollierte Rückhalt von Elbewasser in der Havelniederung (WASY 2010, BFG 2011) und den dortigen Poldern als auch zahlreiche Deichbrüche in Sachsen und Sachsen-Anhalt sorgten dafür, dass der Hochwasserscheitel, vor allem unterhalb der Havelmündung, reduziert wurde (Abb. 2-11). Durch Öffnung des Wehres Neuwerben flossen für die gesteuerte Rückhaltung, wie durch die negativen Abflüsse in Abbildung 2-11 gezeigt wird, bis zu ca. 500 m³/s des Elbeabflusses am Pegel Havelberg Stadt vorbei flussaufwärts in die Havel hinein.

2.3.2 Das Hochwasser vom März/April 2006

Ein typisches Frühjahrshochwasser wird durch das Ereignis im **März/April 2006** (IKSE 2007) beschrieben. Während des schneereichen Winters 2005/2006 baute sich - vor allem auch in den niedrigen Lagen der Gebirge im Einzugsgebiet - eine mächtige Schneedecke auf. Hohe Niederschläge, die laut Deutschem Wetterdienst (GPCC 2006/06/29) im März 2006 bis zu 200 % des langjährigen Monatsmittels betrugen, führten dann zu einer rasanten Schneeschmelze mit Schwerpunkt in den niedrigen und mittleren Höhenlagen. Den größten Beitrag zur Hochwasserentstehung leisteten dabei die aus Böhmen kommenden Nebenflüsse Metuje und Doubrava.



Abbildung 2-12: Gemessene Abflussganglinien während des Hochwassers im März/April 2006

> Abbildung 2-12 zeigt die gemessenen Abflussganglinien während des Hochwassers. Im Gegensatz zum Hochwasser 2002 waren insbesondere die Abflüsse der Moldau aber deutlich geringer. Ein Grund hierfür war der in der Moldaukaskade und der Talsperre Nechranice an der Eger im erheblichen Maße durchgeführte Hochwasserrückhalt (vgl. Abb. 2-19 und Abb. 2-20 in Kap. 2.4.2). Aufgrund dieser Maßnahmen wurde der für Prag kritische Abfluss von 1.500 m³/s (dritte Hochwassergefahrenstufe) nicht überschritten. In Ústí nad Labem, wo ein Scheitelabfluss von 2.540 m³/s gemessen wurde, wurde diese Stufe zwischen dem 28. März und 10. April 2006 erreicht.

> An der Oberen Elbe in Deutschland verursachte das Hochwasser aus Tschechien eine breite Hochwasserwelle mit einer großen Abflussfülle. Bedeutende Hochwasser an deutschen Nebenflüssen wurden in der Mulde und der Saale registriert (Abb. 2-12). Dabei wurden an der Mulde - obwohl die Scheitelwerte des Hochwassers 2002 nicht erreicht wurden - für die Dauer von über einem Monat Wasserstände im Hochwasserbereich gemessen. An der unteren Mittelelbe wurden nur vier Jahre nach dem verheerenden Hochwasser vom August 2002 erneut vergleichbare Scheitelabflüsse und -wasserstände gemessen.

2.3.3 Das Hochwasser vom Januar 2011

Für den Januarmonat vergleichsweise feuchte und warme Witterungsbedingungen haben das Entstehen des Winterhochwassers vom **Januar 2011** (siehe bspw. POH 2011) begünstigt. Da dem Warmlufteinbruch aus Südwesten (6. Januar) ein kalter und schneereicher Frühwinter im November und Dezember (auch im Tiefland) vorausging, sorgte die einsetzende Schneeschmelze für eine lang andauernde Hochwasserwelle entlang der deutschen Elbe (Abb. 2-13).

Im Einzugsgebiet der Moldau traten im Januar 2011 zwei Hochwasserwellen auf, die beide durch eine Kombination aus einsetzender Schneeschmelze und ergiebigen Niederschlägen hervorgerufen wurden. Das erste Hochwasser ereignete sich zwischen dem 7. und 10. Januar vorrangig im Einzugsgebiet der Berounka (HQ₅-HQ₁₀). Die zweite Hochwasserwelle erreichte ihre Scheitelabflüsse zwischen dem 14. und 17. Januar, wobei die Moldaunebenflüsse Berounka, Lužnice, Blanice und Sázava am stärksten betroffen waren (HQ₂₀). Während der zweiten Hochwasserwelle (Hauptereignis), fand ein bedeutendes Abschmelzen der Schneedecke, vor allem in den unteren und mittleren Höhenlagen, statt (PVL 2011). Ähnlich gestaltete sich der Hochwasserablauf im Einzugsgebiet der Eger. Da aufgrund der partiellen Schneeschmelze in der ersten Januarwoche bereits ein großer Anteil der natürlichen Wasserrückhaltekapazität der Böden im Einzugsgebiet aufgebraucht war, führte die zweite Schneeschmelzphase zu einer schnellen Abflussreaktion im gesamten Einzugsgebiet (POH 2011).

Deutsche Nebenflüsse der Elbe, die in erheblichem Maße zur Hochwasserentwicklung beitrugen, sind im Erzgebirge zu finden. Darüber hinaus hatten die Mulde und die Saale einen bedeutenden Einfluss auf die Hochwasserscheitel an der unteren Mittelelbe, wo die Scheitelwasserstände die höchsten Werte der Hochwasser von August 2002 und April 2006 überstiegen. Da sich die Hochwasserscheitel von Saale und Elbe an ihrem Zusammenfluss fast zeitgleich überlagerten, konnte in der Saale ein deutlicher Rückstaueffekt beobachtet werden, der weit über den Pegel Calbe-Grizehne (17,4 km oberhalb der Mündung) hinausreichte.



Abbildung 2-13: Gemessene Abflussganglinien während des Hochwassers im Januar 2011

2.3.4 Das Hochwasser vom Juni 2013

Das Hochwasser vom **Juni 2013** (BFG 2014, IKSE 2014) beschreibt wie das katastrophale Ereignis vom August 2002 ebenfalls den extremen Fall eines Sommerhochwassers, welches durch intensive Starkregenereignisse im tschechischen und auch im deutschen Einzugsgebiet (insbesondere im Saale- und Muldegebiet) hervorgerufen wurde. Eine weitere Ursache war der sehr feuchte Mai - im Mittel fielen im Elbegebiet 122 mm Niederschlag. Dadurch waren die Bodenfeuchtewerte in Deutschland Ende Mai 2013 höher als jemals seit Beginn der Aufzeichnungen 1962 beobachtet. Mit zunehmendem Sättigungswert sinkt die Fähigkeit des Bodens, Niederschlagswasser zu speichern. Dadurch kann es nicht mehr versickern und fließt direkt oberirdisch ab (DWD 2013).

Abbildung 2-14 (IKSE 2014) zeigt für das Elbegebiet die Verteilung der Niederschlagshöhen im Juni 2013. In Südböhmen entlang der oberen Moldau, im Mitteltschechischen Bezirk südlich von Prag und im Erzgebirge lagen die niederschlagsreichsten Regionen. Hier wurden

gebietsweise zwischen 200 mm und 300 mm Niederschlag registriert. Die größten 24-stündigen Niederschläge wurden in Deutschland im Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde an der Station Stützengrün-Hundshübel mit 100,4 mm gemessen (IKSE 2014). Für den Zeitraum zwischen dem 30.05. bis 02.06.2017 wurden hier auch mit 224 mm die höchsten Niederschläge im gesamten Elbegebiet aufgezeichnet.



Abbildung 2-14: Niederschlagskarte für Juni 2013 für das Elbegebiet (Quelle: ČHMÚ, BFG, DWD)

Der Hochwasserablauf in der Oberen Elbe in Tschechien war in besonderer Weise durch die nahezu zeitgleiche Überlagerung der Scheitel der Hochwasserwellen von Elbe und Moldau geprägt (Abb. 2-15). Am Pegel Prag-Chuchle verzeichnete die Moldau ihren Hochwasserscheitel am 4. Juni bei einem Abfluss von 3.040 m³/s (HQ₂₀-HQ₅₀). Der Scheitelabfluss im Juni 2013 war damit an der Moldau in Prag um 2.120 m³/s geringer als beim Hochwasser August 2002. Da im Oberlauf der Elbe am Pegel Kostelec im Scheitel 744 m³/s abflossen, unterhalb der Moldaumündung am Pegel Mělník jedoch als höchster Abfluss nur 3.630 m³/s registriert wurden, wird der Retentionseffekt (Scheitelreduktion) durch die Überflutungen am Zusammenfluss von Moldau und Elbe mit 150 bis 200 m³/s abgeschätzt. Da an der Eger kein nennenswertes Hochwasser beobachtet wurde, stellte sich an der deutsch-tschechischen Grenze ein Scheitelabfluss von 3.750 m³/s (Pegel Děčín) ein.



Abbildung 2-15: Gemessene Abflussganglinien während des Hochwassers im Juni 2013

Der Scheitel der Hochwasserwelle erreichte in Dresden am 06. Juni 2013 einen Wasserstand von 878 cm, der somit um 62 cm niedriger als der Höchststand des Hochwassers im August 2002 ausfiel. In Dresden betrug der Scheitelabfluss 3.940 m³/s, dem eine Jährlichkeit von 50-100 Jahren zugeordnet wird (BFG 2014). Der Hochwasserscheitel der Schwarzen Elster traf fast gleichzeitig auf das Scheitelniveau der Elbe, konnte diesen aber nicht substanziell erhöhen. Der Scheitel der Mulde lief beim Zusammenfluss in Dessau dem Elbescheitel um drei bis vier Tage voraus. Obwohl am Pegel Bad Düben im Scheitel ein Abfluss von 1.770 m³/s gemessen wurde, trug die Mulde aufgrund dieser Überlagerungskonstellation nur rund 400 m³/s zur Scheitelabflusserhöhung des Hochwasserscheitels der Elbe bei.

Im Gegensatz zum Hochwasser 2002 war das Einzugsgebiet der Saale im Juni 2013 extrem von Hochwasser betroffen und infolgedessen wurde auch am Pegel Barby ein neuer höchster bekannter Wasserstand (HHW) registriert. Der Saalescheitel lief der Elbespitze um mehr als zwei Tage voraus. Da die Saale aber nur sehr langsam zurückging, strömten an ihrer Mündung dem Elbscheitel immer noch mehr als 800 m³/s aus der Saale zu. Am Pegel Barby stellte sich ein Scheitelwasserstand von 762 cm bei einem Scheitelabfluss von 5230 m³/s ein, was einem HQ₁₀₀₋₂₀₀ entspricht. Diese statistische Klassifizierung der Scheitelabflüsse verblieb stromab bis zur Tideelbe unverändert (BFG 2014).

Deichbrüche, am 9. Juni im Mündungsbereich der Saale bei Breitenhagen (Ortslage Klein Rosenburg), an der Elbe bei Hohenwarthe sowie am 10. Juni bei Fischbeck (Elbe-km 388) ereigneten sich in unmittelbarer zeitlicher Nähe zu den dortigen Scheiteldurchgängen. Sie verminderten die Breite des Wellenscheitels sowie das Volumen der Hochwasserwelle und wurden so vor allem stromab auch scheitelwirksam (ab Pegel Tangermünde, BFG 2013). Verglichen mit diesen Effekten, hatte die am 9. Juni eingeleitete Flutung der Havelniederung und der angeschlossenen Havelpolder (LUGV BB 2014) deutlichere Minderungseffekte auf den Scheitel der unteren Mittelelbe, auch weil die Havel im Juni 2013 kein eigenes Hochwasser führte. Der summarische Kappungseffekt wird in Abbildung 2-15 in der Gangliniendarstellung für den Pegel Wittenberge sehr deutlich. Der Scheitelabfluss nach Kappung betrug hier 4.330 m³/s.

Entlang der unteren Mittelelbe erfolgte aufgrund der Retention in den teilweise auch heute noch vorhandenen großflächigen Überschwemmungsgebieten eine weitere Abflachung der Hochwasserwelle, so dass der Hochwasserscheitel am Pegel Neu Darchau am 11. Juni bei einem Scheitelwasserstand von 792 cm und einem Scheitelabfluss von 4.080 m³/s eintrat, der somit um ca. 250 m³/s kleiner als am Pegel Wittenberge war. Trotzdem wurden wie an allen anderen oberhalb gelegenen Elbepegeln unterhalb von Coswig auch an den Pegeln Dömitz, Neu Darchau, Hitzacker und Boizenburg die bisher bekannten Scheitelabflüsse und HHW deutlich überschritten (BFG 2014).

2.4 Talsperren im Einzugsgebiet der Elbe

2.4.1 Talsperren in Tschechien (Moldau, Eger, Elbe)

Talsperren werden in Tschechien in der Regel als Mehrzweckspeicher betrieben. Hauptsächlich dient deren Einsatz zu Zwecken der Wasserversorgung, der Erzeugung elektrischer Energie in Wasserkraftwerken und des vorbeugenden Hochwasserschutzes. Darüber hinaus tragen sie dazu bei, den Mindestabfluss und die Wasserqualität abzusichern und durch Niedrigwasseraufhöhung die Schifffahrt zu gewährleisten. Für zahlreiche Freizeitaktivitäten (Sport, Fischfang) sowie von der Fahrgastschifffahrt werden die Talsperren ebenfalls genutzt. Die Steuerung dieser Speicherbecken erfolgt auf der Grundlage von Betriebsanweisungen. Im Falle des Einsatzes als Hochwasserrückhaltebecken ist dabei als Hauptkriterium zu beachten, dass mit der Abgabe aus der Stauanlage unterhalb bestimmte Schutzniveaus eingehalten und somit keine nennenswerten Schäden verursacht werden. Diese auf den Schutz der Unterlieger gesteuerte Abgabe variiert zwischen HQ₁ und HQ₅. Die Lage der wichtigsten (in der vorliegenden Untersuchung berücksichtigten) Talsperren sowie der relevanten Pegel sind für die jeweiligen Teileinzugsgebiete in Abbildung 2-16 dargestellt.



Abbildung 2-16: Gewässernetz des tschechischen Einzugsgebiets der Elbe und Lage wichtiger Pegel und der im Vorhaben analysierten Talsperren (Teileinzugsgebiete farbig unterschieden; gelbe Dreiecke: Talsperren; rote Punkte: Pegel; BALVÍN ET AL. 2017)

Tabelle 2-4 gibt einen allgemeinen Überblick über die Talsperren im tschechischen Teil des Elbegebiets (IKSE 2012). Demnach verfügen die 136 Talsperren im tschechischen Elbegebiet insgesamt über einen Stauraum von 2.567 Mio. m³, was in etwa 25 % des mittleren jährlichen Abflusses dieses Gebiets entspricht. Davon beträgt der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum 231 Mio. m³ (Stand: Ende 2011) bei kontrolliertem Einsatz der Becken für Rückhaltungen im Sommer und vergrößert sich auf 264 Mio. m³ im Winter. Bedeutsame Rückhalteräume liegen an der Moldau und an der Eger, insbesondere sind hier die Talsperren Lipno und Orlík (Moldau) sowie Nechranice (Eger) zu nennen. An der Moldau befindet sich eine weitere große Talsperre Slapy, die zwar nicht über einen gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum

verfügt, aber für den Fall von schneeschmelzbedingten Winterhochwassern vorentleert und danach für den Hochwasserrückhalt eingesetzt werden kann.

Tabelle 2-4: Überblick über Talsperren und grüne Rückhaltebecken > 0,3 Mio. m³ im tschechischen Elbegebiet (IKSE 2012, Stand: Ende 2011)

Teilflussgebiet	Anzahl der	Stauraum	davon gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum		
	Talsperren		Winterhalbjahr	Sommerhalbjahr	
		[Mio. m ³]	[Mio. m³]	[Mio. m ³]	
Elbe oberhalb der Mündung der Moldau (Talsperren)	16	163,25	43,81	34,99	
Elbe oberhalb der Mündung der Moldau (grüne Rückhaltebecken)	6	4,99	4,65	4,65	
Elbe unterhalb der Mündung der Moldau bis zur Staatsgrenze CZ/D	18	27,59	7,13	5,63	
Moldau	72	1895,34	137,4	137,40	
Eger	22	404,33	69,78	47,14	
Mulde	2	72,03	1,27	1,27	
Summe	136	2567,53	264,04	231,08	



Abbildung 2-17: Talsperren an der Moldau im Überblick und Angabe des Wasserstands bei Vollstau (verändert nach BALVÍN ET AL. 2017)

Die Reihe mehrerer gestaffelter Talsperren entlang der Moldau wird auch als "Moldaukaskade" bezeichnet. Hierfür wurden insgesamt 9 Stauanlagen errichtet, die in einem schematisierten Längsschnitt in Abbildung 2-17 grafisch dargestellt sind. An der Moldaukaskade liegt die größte tschechische Talsperre im Hinblick auf den Speicherraum (Talsperre Orlík) und hinsichtlich der Wasseroberfläche (Talsperre Lipno I). Für Hochwasserschutzzwecke steht in diesen Talsperren insgesamt ein gewöhnlicher Rückhalteraum mit einem Speichervolumen von 126,58 Mio. m³ zur Verfügung, der ca. 10 % des Gesamtstauraums der Moldaukaskade von 1.330 Mio. m³ ausmacht. Da diese Anlagen mit ihren großen Speicherbecken oberhalb von Prag liegen, kann durch ihren kontrollierten, gesteuerten Einsatz die tschechische Hauptstadt effektiv vor Hochwassern der Moldau geschützt werden.

Nachfolgend werden die wichtigsten Talsperren der Moldaukaskade (u.a. Lipno, Orlík, Slapy) und die Talsperre Nechranice an der Eger näher vorgestellt. Tabelle 2-5 enthält charakteristische Angaben zu diesen Talsperren, Tabelle 2-6 beschreibt die wesentlichen Merkmale weiterer wichtiger Talsperren im tschechischen Elbeeinzugsgebiet. Erklärungen zu den wichtigsten Größen (Merkmalen) hinsichtlich des Betriebs von Talsperren werden in der Abbildung 2-18 gegeben.



Abbildung 2-18: Schematische Darstellung einer Talsperre mit unterschiedlichen Betriebswasserständen und Speicherräumen (IKSE 2005)

Taleperre (Cowëssor)	Lipno I	Orlík	Kamýk	Slapy	Štĕchovice	Vrané	Nechranice
Taisperre (Gewasser)	(Moldau)	(Moldau)	(Moldau)	(Moldau)	(Moldau)	(Moldau)	(Eger)
Fluss-km	329,54	144,65	134,73	91,69	84,44	71,33	103,44
Einzugsgebiet [km ²]	949	12115	12218	12957	13298	17785	3590
Jahr der Inbetriebnahme	1960	1963	1966	1955	1945	1935	1968
Staufläche bei Vollstau [ha]	4870,0	2732,7	195,0	1162,6	95,7	263,0	1338,0
Dammkrone [m+NN]	728,62	361,10	287,10	279,20	220,80	203,60	274,50
höchstes Stauziel [m+NN]	725,60	353,60	284,60	270,60	219,40	200,10	273,05
Vollstau [m+NN]	725,60	353,60	284,60	270,60	219,40	200,10	271,90
Stauziel [m+NN]	724,90	349,90	284,60	270,60	219,40	200,10	269,00
Absenkziel [m+NN]	716,10	329,60	282,10	246,60	215,80	199,10	235,40
Betriebsraum [Mio. m ³]	253,0	343,1	4,6	200,5	4,2	2,5	233,2
Gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum	33,16	93,42	0	0	0	0	36,56

Tabelle 2-5: Liste bedeutender Talsperren an der Moldau und Eger und ihrer wesentlichen Merkmale

 (POH 2017, PVL 2017)

Tabelle 2-6: Liste weiterer wichtiger Talsperren im tschechischen Elbegebiet und ihrer wesentlichen

 Merkmale (BFG 2012, aktualisiert)

Talsperre (Gewässer)	Skalka (Eger)	Jesenice (Odrava)	Hracholusky (Mže)	Švihov (Želivka)	Seč (Chrudimka)	Rozkoš (Úpa)	Les Království (Elbe)	Rimov (Malše)
Fluss-km	242,41	4,17	22,67	4,29	50,72	3,59	1041,43	21,85
Einzugsgebiet [km ²]	672	411	1609	1178	216	415	532	488
Jahr der Inbetriebnahme	1964	1960	1964	1975	1947	1972	1923	1978
Staufläche bei Vollstau [ha]	378,0	760,0	489,6	1602,6	220,1	1001,3	84,9	211,0
höchstes Stauziel [m+NN]	443,60	440,70	357,97	379,80	490,11	283,00	324,85	471,48
Vollstau [m+NN]	442,60	439,70	354,70	377,00	488,61	282,60	323,40	471,40
Stauziel [m+NN]	437,6 ^w	437,6 ^w	354,10	377,00	486,81	279,6 ^w	314,6 ^w	470,65
	442,2 ^s	439,2 ^s				280,5 ^s	315,6 ^s	
Absenkziel [m+NN]	435,60	427,30	339,60	343,10	469,61	271,60	307,60	442,50
Gewöhnlicher	12,6 ^w	13,2 ^w	2.4	0.0	3.2	25,4 ^w	4,9 ^w	1.6
Hochwasserrückhalteraum	1,3 ^s	3,5 ^s	,.	.,.	- ,—	18,2 ^s	4,5 ^s	,.

(w = Winter, s = Sommer)

Die **Talsperre Lipno I** (Moldau) wurde in den Jahren 1952 bis 1959 gebaut und bildet die oberste Talsperre in der Moldaukaskade. Mit einer Wasseroberfläche von 4.870 ha besitzt diese in Südböhmen gelegene Talsperre das flächenmäßig größte Speicherbecken in Tschechien. Der Gesamtstauraum umfasst ein Volumen von 309,5 Mio. m³, wovon ~ 33 Mio. m³ im gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum gespeichert werden können. Der Absperrdamm besitzt zwei Grundablässe (2 x 86,1 m³/s), die Hochwasserentlastung verfügt über zwei Überläufe (148,42 m³/s). Die Turbinen im Wasserkraftwerk haben eine Kapazität von 2 x 46 m³/s. Ungefähr 10 km unterhalb liegt die Staumauer des Ausgleichsbeckens Lipno II, das zur Vergleichmäßigung des Abflusses aus Lipno I eingesetzt werden kann. Es verfügt über keinen kontrollierbaren gewöhnlichen Hochwasserschutzraum. Der einzuhaltende, schadlose Hochwasserabfluss aus Lipno beträgt zwischen 60 m³/s und 92 m³/s.

Bezogen auf den Stauraum ist die **Talsperre Orlík** (Moldau) das größte Speicherbecken in Tschechien. Sie wurde zwischen 1954 und 1962 gebaut. Die Wasserabfuhr kann über die Überfallkrone mit drei Feldern und Wehrverschlüssen (2183 m³/s) und über zwei Grundablässe (371 m³/s) erfolgen. Das Wasserkraftwerk ist mit vier Turbinen ausgerüstet (4 x 150 m³/s). Der Betrieb der Talsperre Orlík ist mit dem ca. 10 km unterhalb gelegenen Ausgleichsbecken Kamýk, das über ein Gesamtstauraum von 12,98 Mio. m³ verfügt, rückgekoppelt. Der Gesamtstauraum der Talsperre Orlík umfasst ein Speichervolumen von 716,5 Mio. m³, wovon ~ 93 Mio. m³ zur Speicherung im gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum herangezogen werden können. Für Hochwasserschutzzwecke kann in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen (z. B. der Höhe des Wassergehalts der Schneedecke im Bergland) eine Vorentleerung des Betriebsraums durch Absenkung des Stauziels um bis zu 20 m vorgenommen werden (Hochwasser 2006, IKSE 2007; vgl. Abb. 2-19 und Abb. 2-20).

Die **Talsperre Slapy** (Moldau) wurde im Jahr 1955 fertig gestellt. Ihr Gesamtstauraum beträgt 269,3 Mio. m³. Sie besitzt keinen gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum und kann somit nur bei schneeschmelzbedingten Winter-/Frühjahrsereignissen einen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten. Dann kann das Stauziel abgesenkt und somit freie Kapazitäten für nachfolgende Speicherungen im Betriebsraum geschaffen werden (Vorentleerung). Die Steuerung erfolgt somit in Abhängigkeit von den Schneeverhältnissen im Einzugsgebiet und der operationellen Vorhersage der Vorhersagestelle des Tschechischen Hydrometeorologischen Instituts (ČHMÚ).

Die **Talsperre Nechranice** (Eger) stellt mit ihrer Wasseroberfläche von 1.338 ha die fünftgrößte Talsperre in der Tschechischen Republik dar und besitzt den längsten Erdabsperrdamm in Mitteleuropa (3.280 m). Sie wurde zwischen 1961 und 1968 gebaut. Die Staumauer der Talsperre verfügt über zwei Grundablässe (2 x 50,7 m³/s) und Überläufe an der Dammkrone (1.193 m³/s); außerdem existiert ein Wasserkraftwerk (2 x 16 m³/s). Die Talsperre Nechranice besitzt einen Stauraum von 288 Mio. m³, wovon 36,6 Mio. m³ als gewöhnlicher Hochwasserschutzraum genutzt werden können. Unterhalb der Talsperre soll für Hochwasserschutzzwecke ein schadloser Abfluss von 170-200 m³/s in der Eger eingehalten werden.

2.4.2 Steuerung der tschechischen Talsperren

Die Steuerung der Talsperren erfolgt auf Grundlage von Betriebsanweisungen. Im Falle des Einsatzes als Hochwasserrückhalteraum ist dabei als Hauptkriterium zu beachten, dass mit der Abgabe unterhalb der Stauanlage bestimmte Schutzniveaus eingehalten und somit keine nennenswerten Schäden verursacht werden. Diese auf den Schutz der Unterlieger gesteuerte Abgabe variiert zwischen HQ₁ und HQ₅. Die Steuerungsanweisungen zum Betrieb der Talsperren wurden in der Vergangenheit mehrmals überprüft und angepasst (BALVÍN ET AL. 2017), um neue Gesichtspunkte des Hochwasserschutzes zu integrieren und neue gesetzliche Vorgaben in der Wasserwirtschaft zu berücksichtigen. Auch im Verlauf eines Jahres kann für

> einige Talsperren die Steuerung, d. h. das Stauziel, variieren. Grundsätzlich muss der gewöhnliche Hochwasserschutzraum (vgl. Abb. 2-18) freigehalten werden; weiterhin gibt es keine starr zu befolgenden Betriebsanweisungen, jedoch allgemeine, sich auf Erfahrungen stützende Richtlinien für die Vorentleerung der Speicherbecken bei anlaufendem Hochwasser. Der Betrieb der Talsperren hängt somit von den jeweiligen vorherrschenden hydrologischen Verhältnissen ab und unterscheidet sich im Winter- und Sommerhalbjahr normalerweise voneinander. Mit den Möglichkeiten des gesteuerten Einsatzes der Speicherbecken kann die für den Betrieb der Anlagen zuständige Behörde alle notwendigen Hochwasserschutzmaßnahmen anordnen, an der Moldau insbesondere für Prag. Bezugnehmend auf bestehende Notfallpläne und die Errichtung mobiler Schutzwände und weiterer Schutzmaßnahmen, muss die maximal zulässige Abgabe aus den Becken solange eingehalten werden, bis die erforderlichen Schritte für den Hochwasserschutz abgeschlossen sind. Der Zeitplan kann im Verlauf eines Hochwassers geändert werden, wenn sich die Größe und die Ankunftszeit der Hochwasser von den hydrologischen Vorhersagen unterscheiden (BALVÍN ET AL. 2017).

> Die Vorentleerung einiger Speicherbecken (z. B. Talsperre Orlík), durch die zusätzlich zum gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum, ein größeres verfügbares Volumen des Betriebsraums in den Talsperren zum Hochwasserrückhalt bereitgestellt werden kann, erfolgt sukzessive mit ansteigender Abgabe. Abbildung 2-19 zeigt die beim **Hochwasser 2006** eingeleitete Vorentleerung der Talsperre Orlík (IKSE 2007). Das Hochwasser lief in den Monaten März und April des Jahres ab. Aufgrund der zeitlichen Entwicklung des äquivalenten Wassergehalts der Schneedecke im Verlauf des Winters 2005/2006 wurden die Wasserstände in den Speicherbecken im Zuge des Flussgebietsmanagements schon mit Beginn des Jahres 2006 sukzessive abgesenkt. Dadurch entstand ein enormes Speichervolumen zur Reduzierung der ablaufenden Hochwassers Betriebszustände gefahren, die das Ziel hatten, den freien Speicherraum in den Talsperren maximal zur Hochwasserabminderung einzusetzen. Die größten Auswirkungen auf das Hochwasser hatten dabei die Talsperren Lipno I und Orlík, deren Einsätze nennenswerte Beiträge zur Rückhaltung leisteten.

> Zu Beginn des Hochwassers war der Wasserstand in der Talsperre Lipno I so stark abgesenkt. dass insgesamt ein freier Speicherraum von 153 Mio. m³ zur Verfügung stand. Im anlaufenden Ast der Hochwasserwelle und auch zum Zeitpunkt der größten Abgabe aus dem unterhalb gelegenen Ausgleichsbecken Lipno II wurden die Abflüsse auf ein Minimum reduziert, und die gesamte sich bis dorthin aufbauende Hochwasserwelle der Moldau konnte durch den Einsatz in der Talsperre Lipno zurückgehalten werden. Der höchste Zufluss in den Speicherraum betrug 190 m³/s (HQ₁₀ bis HQ₂₀). Zwar stieg die Abgabe aus der Talsperre im Verlauf des Hochwassers an, erreichte aber unterhalb des Ausgleichsbeckens Lipno II nicht den für den Hochwasserschutz einzuhaltenden schadlosen Wert von 90 m³/s. Der gewöhnliche

Hochwasserschutzraum in der Talsperre Lipno I wurde während des Hochwassers nicht in Anspruch genommen.



Abbildung 2-19: Vorentleerung der Talsperre Orlík während des Hochwassers 2006 (IKSE 2007)

In der Vorphase des Hochwassers 2006 wurde der Wasserstand in der Talsperre Orlík um etwa 10 m abgesenkt (Abb. 2-19), wodurch insgesamt ein Volumen von 320 Mio. m³ für den Hochwasserrückhalt zur Verfügung stand. Der maximale Zufluss in den Speicherraum betrug während des Hochwassers ca. 1.200 m³/s (Abb. 2-20). Die Welle wurde mit Hilfe des gesteuerten Einsatzes der Talsperre so transformiert, dass der Scheitelabfluss in Prag (Pegel Chuchle, HQ=1.430 m³/s, Abb. 2-12) nicht den für den Hochwasserschutz maßgeblich einzuhaltenden Wert von 1.500 m³/s überschritt. Hierzu trug auch die Talsperre Slapy bei, in der durch die Vorentleerung ein Volumen von 35 Mio. m³ bereitgestellt werden konnte. Alle Maßnahmen in den teilweise eingesetzten Talsperren waren abgestimmt auf die hydrologischen Bedingungen im gesamten Einzugsgebiet und insbesondere auf die Entwicklung in den Hochwasser führenden Nebenflüssen Sázava und Berounka, die unterhalb der Talsperre Orlík in die Moldau münden.

In der Talsperre Nechranice (Eger) waren am 20.3.2006 insgesamt 81,3 Mio. m³ freier Speicherraum für die Hochwasserrückhaltung verfügbar. Durch den Einsatz konnte der maximale Zufluss in die Talsperre von 382 m³/s (HQ₅) auf eine maximale Abgabe von 235 m³/s reduziert werden (vgl. BFG 2012).



Abbildung 2-20: Steuerung der Talsperre Orlík während des Hochwassers 2006 (IKSE 2007)

Im Sommer herrschen hingegen ganz andere Bedingungen für eine mögliche Vorentleerung der Talsperren. Diese hängt dann vom Ausmaß des vorhergesagten Hochwassers, den Vorhersagezeiträumen und der Verlässlichkeit der meteorologisch-hydrologischen Vorhersage (1 bis 2 Tage) ab. Aufgrund der kurzen Wellenlaufzeiten und der sommerlichen Hochwassergenesen im Elbeeinzugsgebiet, deren Vorhersage ein hohes Maß an Unsicherheit beinhalten kann, ist es einleuchtend, dass in den an den Oberläufen der Flüsse gelegenen Talsperren kein großer Zeitraum für die Absenkung der Beckenwasserstände mit dem Ziel der Vorentleerung des Betriebsraums vorhanden ist. Zudem sind zeitliche Randbedingungen für die maximale Abgabe aus den Talsperren zu beachten. Für die Talsperre Orlík ist so im Sommer in der Regel lediglich eine Vorentleerung des Betriebsraums von 10-20 Mio. m³ möglich (KAŠPÁREK ET AL. 2006). Trotzdem konnte auch beim Hochwasser im August 2002 durch den Einsatz der tschechischen Talsperren eine nennenswerte Scheitelreduktion erreicht werden, weshalb die Steuerung der Moldaukaskade anhand dieses Hochwassers ebenfalls beispielhaft beschrieben werden soll.

Der Wasserstand der Talsperre Lipno lag vor dem **Hochwasser 2002** 71 cm unter dem damals maximal möglichen Wasserstand von 725,35 m ü. M. im Sommerhalbjahr. Dadurch stand für die Hochwasserrückhaltung ein zusätzliches freies Volumen von 12 Mio. m³ zur Verfügung, so dass mit dem gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum insgesamt ein Speichervolumen von 45 Mio. m³ bereit für den Einsatz war. Die erste Hochwasserwelle konnte durch die Rückhaltungen in Lipno I vollständig gefahrlos nach unterstrom abgegeben werden. Bei Anlaufen der zweiten Hochwasserwelle (vgl. Kap. 2.3.1) besaß das Speicherbecken dann allerdings nur noch ein freies Volumen von ~ 23 Mio. m³. Die größte Abgabe aus der Talsperre Lipno betrug in der zweiten Welle 320 m³/s (HQ₁₀₀) bei einem maximalen Zufluss in den Speicherraum von 470 m³/s (HQ₅₀₀). Dies führte zu einer Hochwasserscheitelreduzierung von mindestens 150 m³/s alleine schon durch den Einsatz der Talsperre Lipno.

In der Talsperre Orlík war zu Beginn des Hochwassers 2002 der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum vollständig freigehalten. Der Beckenwasserstand lag am 05.08.2002 mit einem Wasserstand von 348,50 m ü. M. deutlich unter dem damaligen Stauziel von 351,20 m ü. M. (Abb. 2-21), so dass insgesamt ein Volumen von 126 Mio. m³ als Speicherraum verfügbar war. Aufgrund ergiebiger Niederschläge im oberen Einzugsgebiet wuchsen die in die Talsperre Orlík mündenden Zuflüsse aus der Otava, Malše und Lužnice an, so dass im ersten Wellenscheitel ein Scheitelabfluss von 1.700 m³/s (08.08.2002, abends) als Talsperrenzufluss in der Moldau auftrat. Nachdem alle notwendigen Hochwasserschutzmaßnahmen ergriffen wurden, betrug der maximale Abfluss aus der Talsperre bei der ersten Welle 1.120 m³/s (Abb. 2-21). Aufgrund der anhaltenden ungünstigen Wetterlage mit starken Niederschlägen wuchs die Abgabe wieder an und erreichte am 11.08. einen Wert von 1.200 m³/s. Bis zum Zeitpunkt, an dem die zweite Hochwasserwelle anlief, war der Beckenwasserstand in der Talsperre Orlík auf 349,46 m ü. M. heruntergefahren, so dass ein freies Volumen von ca. 104 Mio. m³ für Speicherzwecke zur Verfügung stand.

Die zweite Welle war gekennzeichnet durch einen äußerst schnellen Anstieg der Zuflüsse in den Speicherraum und erreichte in ihrem Scheitel einen Abfluss von 3.900 m³/s in der Moldau. Sukzessiv erhöhte man dabei auch die Abgabe aus der Talsperre und erreichte im Maximum einen Wert von 3.100 m³/s, so dass der Hochwasserscheitelabfluss um ca. 800 m³/s reduziert werden konnte. Dieses Hochwasser der Moldau, das oberhalb von Orlík einem 1000-jährlichen Ereignis entsprach, konnte durch den Betrieb der Talsperre auf ein 100jährliches Hochwasser abgemindert werden. Der höchste Beckenwasserstand wurde mit 355,17 m ü. M. erreicht. Dies bedeutet, dass der für Rückhaltezwecke aufgestaute Wasserstand mehr als 1,50 m höher als das höchste Stauziel der Talsperre Orlík war. Hervorgerufen wurde diese kritische Situation durch technisches Versagen am Kraftwerk, so dass deutlich mehr Abfluss zurückgehalten wurde, als im eigentlichen Steuerungsreglement vorgesehen ist. Ohne dieses technische Versagen, wäre der Abfluss aus der Talsperre um ~ 600 m³/s größer, das zurückgehaltene Volumen geringer und der Wasserstand in der Talsperre deutlich niedriger gewesen (BALVÍN ET AL. 2017).

In der Talsperre Nechranice (Eger) wurden im Verlauf des Hochwassers 2002 bei nahezu normalen hydrologischen Bedingungen durch den Betrieb der Talsperre große Scheitelreduzierungen von > 200 m³/s erzielt (BALVÍN ET AL. 2017).



Abbildung 2-21: Steuerung der Talsperre Orlík während des Hochwassers 2002 (PVL 2003)

2.4.3 Talsperren in Thüringen (Saale)

Mit einer Anzahl von 86 Talsperren (> 0,3 Mio. m³ Rückhalteraum) und einem Gesamtstauraum von annähernd 1 Mrd. m³ (IKSE 2012) besitzt das Saaleeinzugsgebiet in Deutschland nach dem Einzugsgebiet der Moldau in Tschechien das zweitgrößte in Form von Rückhalteräumen realisierte Speichervolumen. Vom darin enthaltenen gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum von 244 Mio. m³ (Winterhalbjahr) bzw. 191 Mio. m³ (Sommerhalbjahr) entfallen derzeit bis zu 55 Mio. m³ auf die in Thüringen befindlichen Talsperren "Bleiloch" und "Hohenwarte" an der Saale. Sie bilden die beiden wichtigsten Stauhaltungen der "Saalekaskade" und machen mit zusammen ~ 400 Mio. m³ Gesamtstauraum 40 % des im Saaleeinzugsgebiet realisierten Talsperrenvolumens aus. Tabelle 2-7 gibt einen Überblick über die wichtigsten Merkmale der beiden Talsperren sowie der ebenfalls zur Saalekaskade gehörenden Talsperren Walsburg, Wisenta und Hohenwarte II. Insgesamt erstreckt sich die Saalekaskade über eine Länge von 80 km zwischen dem oberhalb gelegenen Pegel Blankenstein-Rosenthal (Saale-km 357) und dem Pegel Kaulsdorf (Saale-km 281). Abbildung 2-22 zeigt eine schematische Übersicht der Saalestauseen zwischen Blankenstein und Saalfeld.

Tabelle 2-7: Liste der zu der Saalekaskade gehörenden Talsperren und ihre wesentlichen Merkmale (Quelle: Datenlieferung der TLUG im Januar 2018)

Talsperre (Gewässer)	Talsperre Bleiloch	Ausgleichsbecken Burgkhammer	Talsperre Wisenta	Talsperre Walsburg	Talsperre Hohenwarte	Oberbecken Hohenwarte II	Ausgleichsbecken Eichicht
Einzugsgebiet [km ²]	1240	1249	165	1262	1657	-	1665
Jahr der Inbetriebnahme	1933	1933	1934	1939	1941	1963	1945
Staufläche bei Vollstau [km²]	9,20	0,78	0,28	0,52	7,30	0,22	0,71
Höchstes Stauziel [m+NHN]	410,34	356,99	389,00	339,51	305,10	551,01	244,07
Vollstau [m+NHN]	410,04	355,99	389,00	339,51	304,50	551,01	244,07
Stauziel [m+NHN]	405,83 ^w 407,49 ^s	355,99	389,00	339,46	301,99 ^w 302,84 ^s	551,01	244,07
Absenkziel [m+NHN]	398,04	351,49	386,00	336,01	285,10	535,51	236,57
Betriebsraum [Mio. m ³]	56,32 ^w 70,32 ^s	3,08	0,59	1,48	90,69 ^w 96,66 ^s	3,22	4,49
Gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum	36,97 ^w 22,97 ^s	0,00	0,00	0,02	18,00 ^w 12,02 ^s	0,00	0,00

(w = Winter, s = Sommer)



Abbildung 2-22: Talsperren an der Saale im Überblick mit Angabe der Pegel und Zuflüsse (verändert nach VATTENFALL AG 2017)

> Wie in Tschechien, so fungieren auch die Talsperren der Saalekaskade als multifunktionale Speicher. Erste Pläne für deren Realisierung wurden bereits nach dem Katastrophenhochwasser im Jahr 1890 entworfen und sehen den Hochwasserschutz als eine der wesentlichen Aufgaben an (VEB, Jahr unbekannt). Mit dem Bau des Mittellandkanals wurde es notwendig, für den Kanal und für die Elbe einen Vorratsspeicher für Zuschusswasser zu schaffen. Heute wie damals dient die Saalekaskade darüber hinaus der Energieerzeugung, der Trinkwasserbereitstellung und der Sicherung des Mindestabflusses in der Saale unterhalb der Mündung der Loquitz. Die sogenannte "Salzsteuerung", die mit einer Abgabe von durchschnittlich 250 Mio. m³/Jahr in den 1980er-Jahren ihr Maximum erreichte und der Herabsetzung der aus dem Südharz-Kalirevier stammenden Versalzung diente, wird mit dem Stopp des Kaliabbaus seit dem Jahr 1996 nicht mehr praktiziert (VEB Jahr unbekannt, TLUG 2007).

> Der Talsperrenverbund der Saalekaskade wird gesamtheitlich bewirtschaftet. Für die Bewertung des Hochwasserrückhaltes werden die Inhalte der beiden großen Stauseen Bleiloch und Hohenwarte gemeinsam betrachtet. Bei den übrigen fünf Speichern (drei weitere Talsperren (s. o.) und zwei Ausgleichsbecken Burgkhammer und Eichicht) handelt es sich weitestgehend um kleinere Ausgleichsbecken, die kein nennenswertes Rückhaltevolumen besitzen. Tabelle 2-7 gibt an, dass in Abhängigkeit von der Jahreszeit der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum der beiden großen Saaletalsperren zwischen 35 Mio. m³ und 55 Mio. m³ schwanken kann. Darüber hinaus ist es möglich, den Betriebsraum der Talsperren (bspw. in Abhängigkeit von der Schneerücklage im Einzugsgebiet) zu nutzen, wenn das jeweilige Stauziel nicht ausgeschöpft ist.

> Dies war beispielsweise beim Hochwasser des Jahres 2013 der Fall, als der Gesamtinhalt von Hohenwarte und Bleiloch etwas unterhalb des zulässigen Stauziels für das Sommerhalbjahr lag (TLUG 2015). So konnte der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum trotz hoher Niederschläge im Mai 2013 bis Ende des Monats freigehalten werden. Abbildung 2-23 zeigt, wie zu Beginn des Juni 2013 der Gesamtzufluss zum Talsperrenverbund von 100 m³/s auf über 300 m³/s anstieg und die Abgabe der Talsperren, welche als Abfluss am unterhalb gelegenen Pegel Kaulsdorf wirksam wird, auf bis zu 150 m³/s erhöht werden musste. Mit einem zurückgehaltenen Volumen von ca. 50 Mio. m³ (BFG 2013) konnte der Scheitel am Pegel Kaulsdorf somit um etwa 170 m³/s reduziert werden.

Der in den Saaletalsperren bei Hochwasser durchgeführte Rückhalt kann je nach Verlauf eines Ereignisses nicht nur für eine Reduktion der Scheitelwasserstände an der Saale sorgen, sondern sich auch positiv auf den Hochwasserablauf der Elbe auswirken. Ob dort ein Effekt erzielt wird, hängt wesentlich vom zeitlichen Aufeinandertreffen des Saale- und des Elbescheitels sowie von der Größe des Saalehochwassers ab. Während beim Hochwasser im August 2002 an der Saale selbst kein nennenswertes Hochwasser beobachtet (Rückhalt in der Saalekaskade: 7 Mio. m³, vgl. BFG 2012) und somit auch keine Wirkung in der Elbe erzielt wurde, bewirkten die Saaletalsperren beim Hochwasser 2006 und 2011 Scheitelreduktionen an der Elbe unterhalb der Saalemündung von bis zu 7 cm (2006; in Tangermünde) und etwa 10 cm (2011; entlang der gesamten Unteren Mittelelbe) (BFG 2012). Hierzu wurden 77 Mio. m³ (2006) bzw. 136 Mio. m³ (2011) in den Saaletalsperren zurückgehalten.



Abbildung 2-23: Konstruierter Gesamtzufluss zur Saalekaskade und Abgabe am Pegel Kaulsdorf (TLUG 2015)

Bundesanstalt für Gewässerkunde

> Bericht BfG-1938

3 Erkenntnisse zur Inhomogenität von HQ-Reihen in Deutschland und Tschechien

Bei statistischen Analysen von Hochwasserabflüssen wird davon ausgegangen, dass die verwendeten Datenreihen frei von Fehlern (konsistent) sind, nur voneinander unabhängige Elemente enthalten und darüber hinaus zeit- und mengenmäßig repräsentativ sind (DYCK 1980). Weiterhin müssen die verwendeten Datenreihen das Kriterium der Homogenität erfüllen, d. h. die Messwerte sollten derselben Grundgesamtheit angehören und dürfen daher nicht wesentlich durch anthropogene oder natürliche Veränderungen im Gewässer oder im Einzugsgebiet während des Auswertungszeitraums gestört sein (DYCK 1980, SACHS 1993; vgl. hierzu auch Kap. 12.1). Bei anthropogenen Veränderungen wird zwischen sprunghaften (Überleitungen, Entnahmen, Rückhaltebecken, Talsperren; einfach zu quantifizieren) und allmählichen Veränderungen (nutzungsbedingte Änderungen der Retentionseigenschaften und Abflussbereitschaft; schwieriger zu quantifizieren) unterschieden.

Für den Umgang mit solchermaßen hervorgerufenen Inhomogenitäten gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ist der Einfluss der anthropogenen Veränderung auf das Abflussregime gering, dann kann die gesamte Beobachtungsreihe für die Hochwasserstatistik herangezogen werden. Sind die Veränderungen bedeutend und können nicht einem einzelnen, sondern mehreren sich überlagernden Eingriffen zugeordnet werden, dann besteht die Möglichkeit, den Untersuchungszeitraum so zu wählen, dass die wesentlichen Beeinflussungen eliminiert werden. Bei klar definierten Eingriffen mit großer Bedeutung (bspw. Bau von Talsperren) besteht diese Möglichkeit ebenfalls. So beginnen die Beobachtungsreihen zur Ermittlung des hydrologischen Abflusslängsschnitts an der Saale unterhalb der Saalekaskade alle frühestens im Jahr 1943 und somit nach Fertigstellung der Talsperre Hohenwarte (TLUG 2015A, HAUPT ET AL. 2015). In anderen Projekten, bspw. am Oberrhein (HSK 1978), im tschechischen Einzugsgebiet der Elbe (KAŠPÁREK ET AL. 2006) sowie im hier beschriebenen Projekt der FGG Elbe mit der BfG, wurde unter Einsatz mathematischer Abflussmodelle eine Bereinigung von bedeutenden Inhomogenitäten in den langen HQ-Reihen vorgenommen. Die verschiedenen hierzu gewählten Vorgehensweisen und Ergebnisse der hydraulisch-statistischen Untersuchungen werden im Folgenden zusammengefasst vorgestellt.

3.1 Homogenisierung von HQ-Reihen im Rheingebiet

Aufgrund des Oberrheinausbaus zwischen 1955 und 1977 mit der Errichtung von Stauhaltungen zwischen Basel und Iffezheim und dem damit verbundenen Wegfall von großen Überschwemmungsgebieten im Oberrheingraben wurde der Ablauf von Rheinhochwassern erheb-

> lich verändert. Dies hatte zur Folge, dass neben der Wellenbeschleunigung eine deutliche Erhöhung der Hochwasserscheitelabflüsse und damit verbunden eine erhebliche Reduzierung der Hochwassersicherheit in der unterhalb der Ausbaustrecke gelegenen Strecke des Oberrheins verursacht wurde (HSK 1978). Abbildung 3-1 (ENGEL 1997) zeigt die mit mathematischen Abflussmodellen ermittelten Wirkungen des Oberrheinausbaus am Beispiel des Rheinhochwassers vom April 1983 an den Pegeln Maxau (unterhalb der Ausbaustrecke) und Worms (unterhalb der Neckarmündung). Bemerkenswert ist, dass der vorgenommene Ausbau nicht am Pegel Maxau, sondern am Pegel Worms, d. h. ca. 100 km unterhalb der ausgebauten Rheinstrecke, die größten Wirkungen auf den Hochwasserablauf und Scheitelabflüsse herbeigeführt hat. Am Pegel Worms lief vor dem Ausbau (1955) die Neckarwelle der Rheinwelle um ca. 2 Tage voraus. Die ausbaubedingt beschleunigte Rheinwelle, die in Abbildung 3-1 am Pegel Maxau (1977) deutlich erkennbar wird, überlagert sich mit ihrem Scheitel jetzt auf den Scheitel der Neckarwelle. Aus dem zweigipfeligen Hochwasser vor dem Oberrheinausbau (1955) entstand in Worms nach dem Ausbau (1977) ein Ereignis mit einem Gipfel.



Abbildung 3-1: Berechnete Wirkungen des Oberrheinausbaus beim Hochwasser April 1983 an den Pegeln Maxau/Rhein und Worms/Rhein (ENGEL 1997)

Für die Hochwasserstatistik hatte der Oberrheinausbau eine Inhomogenität in den langen, bis 1870 zurückreichenden HQ-Reihen für die Oberrheinpegel Maxau und Worms zur Folge. Die internationale Hochwasserstudienkommission (HSK) für den Rhein hat sich in den Jahren zwischen 1968 und 1978 dieser Problematik angenommen und eine Methodik zur Herstellung homogener HQ-Reihen für die Zustände vor (1955) bzw. nach (1977) dem Oberrheinausbau entwickelt. Diese fußte darauf, dass mit den jeweiligen Modellen für beide Zustände anhand einer Auswahl repräsentativer modellierter Hochwasser mathematisch-statistische Beziehungen (Transformationsfunktionen) zur Umrechnung der nicht modellierten HQ-Werte abgeleitet wurden. Die so generierten homogenen Reihen bildeten die Grundlage für die statistische Berechnung der jeweils zustandsbezogenen Extremwerte, wodurch sich z. B. die Auswirkungen des Oberrheinausbaus auf Hochwasser bestimmter Jährlichkeiten und somit die Verschlechterung der Hochwassersituation am Oberrhein quantifizieren ließen.

Die Methode der Hochwasserstudienkommission wurde zunächst speziell nur für die beiden Oberrheinpegel Maxau und Worms entwickelt und angewendet. Da die Wiederherstellung des vormaligen Hochwasserschutzes am frei fließenden Oberrhein im Vordergrund der Untersuchungen der HSK stand, fokussierte sie hauptsächlich ihre Untersuchungen auf die Ermittlung statistischer Abflüsse für HQ₁₀₀ und HQ₂₀₀ an diesen beiden Pegeln. Später entstanden diverse Länder-Bund Arbeitsgruppen im Rheingebiet, die dieses Verfahren auch zur Beurteilung aktueller Hochwassersicherheiten (inkl. Berücksichtigung von Hochwasserschutzmaßnahmen) für weitere regional bedeutsame Pegel am Mittel- und Niederrhein (Kaub, Köln und Rees) bis in die Niederlande (Lobith) anwendeten (BFG 1999; LUA NRW 2002). Abbildung 3-2 zeigt eine aus BFG (1999) entnommene lineare Regression zwischen simulierten Hochwasserscheiteln am Pegel Köln für verschiedene Zustände ohne und mit Retentionsmaßnahmen. In geringfügig modifizierter Form wurde die Methode der HSK für den Rhein auch im vorliegenden Projekt an der Elbe angewendet (vgl. Kap. 4).



Abbildung 3-2: Lineare Regression simulierter HQ-Werte am Pegel Köln für die Zustände 1977 (ohne Retentionsmaßnahmen) und 1998 (mit Retentionsmaßnahmen) (BFG 1999)

3.2 Homogenisierung von HQ-Reihen im tschechischen Elbegebiet

Die Untersuchung des tschechischen Instituts für Wasserforschung (VÚV TGM) wählte eine völlig andere Methode zur Generierung von zustandsbezogenen homogenen HQ-Reihen für die Pegel im tschechischen Moldau- und Elbegebiet (KAŠPÁREK ET AL. 2006). Durch die Errichtung großer Talsperren bis in die 1960er-Jahre (v.a. an der Moldau oberhalb der Hauptstadt Prag und an der Eger, vgl. Kap. 2.4.1) sind die auf Messwerte basierten HQ-Reihen für die Jahre 1890 bis 2002 für Pegel unterhalb dieser Anlagen inhomogen und sollten in dieser Form nicht für extremwertstatistische Berechnungen verwendet werden.

Vergleichbar den Untersuchungen der HSK für den Rhein existieren auch für die Gewässer im tschechischen Elbeeinzugsgebiet jeweils kalibrierte, hydrologisch-hydraulische Modellsysteme, die den Hochwasserablauf in den beiden Zuständen mit und ohne Berücksichtigung der Talsperren simulieren können. Diese Modelle wurden im Unterschied zur Vorgehensweise der HSK jedoch nicht nur für eine repräsentative Auswahl von Hochwasserereignissen eingesetzt, sondern lieferten die Datengrundlage für alle Hochwasserereignisse ab 1890. Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) wurden eingesetzt, um fehlende Abflüsse aus den Einzugsgebieten der Nebenflüsse zu generieren, Speichermodelle der Talsperren bildeten deren Steuerung im Hochwasserfall ab und verschiedene (hydraulische) Methoden zur Abflussmodellierung simulierten den Wellenablauf in den Hauptgewässern. Für alle 113 Ereignisse seit 1890 standen nach der so erfolgten Modellierung Ganglinien und (simulierte) HQ-Werte für die Zustände mit und ohne Wirkung der Talsperren zur Verfügung.

KAŠPÁREK ET AL. (2006) stellt für bedeutsame Pegel an der Moldau (Prag-Chuchle), der Elbe (Mělník, Ustí und Děčín) und der Eger (Louny) die Ergebnisse der statistischen Berechnungen für beide homogene Zustände dar, um die Einflüsse der Talsperren auf Hochwasser bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten ermitteln zu können. Abbildung 3-3 zeigt die aus der der Studie entnommene Darstellung für den Pegel Ustí nad Labem mit abgeleiteten Verteilungsfunktionen auf Basis der homogenen HQ-Reihen 1890 bis 2002. Der Vergleich der Funktionen mit und ohne Talsperrenwirkung verdeutlicht den abflussreduzierenden Einfluss aufgrund des Talsperrenbetriebs, der mit zunehmender Jährlichkeit zwar abnimmt, aber insgesamt bis zu hohen Abflüssen eine Verbesserung der Hochwassersicherheit an der Elbe hervorruft.

Verschiedene Studien in Deutschland weisen seit den 1980er-Jahren darauf hin, dass der Betrieb der tschechischen Talsperren nicht nur eine positive Wirkung auf Hochwasser der Elbe in Tschechien, sondern entlang des gesamten Elbelaufs in Deutschland besitzt. Für die Wasserwirtschaftsdirektion Untere Elbe/Magdeburg in der ehemaligen DDR untersuchte SIMON (1983) die Auswirkungen der Talsperren auf Basis der homogenen Zeitreihen 1931/1955 (vor Realisierung der großen Talsperren an der Moldau) und 1958/1982 (überwiegend nach Bau der Moldaukaskade). Für den Pegel Dresden zeigten sich Differenzen der ermittelten Extremwerte zwischen 230 m³/s (HQ₂) und 430 m³/s (HQ₅₀), die SIMON (1983) auf die Wirkung der realisierten Talsperrenvolumina zurückführte. Nach heutigem Stand des Wissens ist die Vorgehensweise von SIMON (1983) zum Wirkungsnachweis mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Außerdem waren aufgrund der kurzen Zeitreihen weitergehende abgesicherte Aussagen zu höheren Abflüssen (bspw. im Bereich HQ₁₀₀) nicht möglich.



Abbildung 3-3: Berechnete Verteilungsfunktionen für Zustände mit und ohne Talsperren am Pegel Ustí nad Labem (KAŠPÁREK ET AL. 2006)

Veröffentlichungen der IKSE (2009), des DWA (2008), von BELZ ET AL. (2008) und des KIT (HELMS ET AL. 2016B) haben in der Folgezeit diese Thematik aufgenommen, konnten jedoch ebenfalls keine vollumfängliche Auskunft zu Ausmaß und Wirkweite der tschechischen Talsperren geben. Für einzelne Hochwasser wurde dies in BFG (2012, 2013) erstmals mit hydraulischen Modellen großräumig nachgewiesen, im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung ist nun auch für die deutschen Pegel an der Elbe eine Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf die Extremwertstatistik möglich.

3.3 Erstellung der HQ-Reihen im deutschen Elbegebiet

Die Ermittlung der aktuell gültigen Extremwertstatistik und des darauf basierenden gleichwertigen Abflusslängsschnitts der Elbe erfolgte seinerzeit basierend auf der Arbeit einer Bund-Länder-Arbeitsgruppe, deren Ergebnisse im Bericht BfG-1589 (BELZ ET AL. 2008)

> veröffentlicht wurden. Die dort vorgelegten Zahlen wurden für die Ableitung des hydrologischen Längsschnitts und die Berechnung einer Grundlage für die Bemessungswasserspiegellagen der Elbe weiterverwendet (Bericht BfG-1650, vgl. BFG 2009); eine Aktualisierung der HQ-Werte erfolgte vor dem Hintergrund des Hochwassers 2013 wiederum im Rahmen einer Bund-Länder-Abstimmung (vgl. IKSE 2014). Die Ergebnisse aller genannten Untersuchungen fußten auf den offiziellen Abflussdaten für die maßgeblichen Pegel an der deutschen Binnenelbe.

> Die mangelhafte Qualität dieser Abflussdaten wurde bei zahlreichen hydrologischen Bearbeitungen im Elbegebiet konstatiert und unter anderem auch im Rahmen der Bund-Länder-Arbeitsgruppen in den zuvor beschriebenen Projekten bezüglich der HQ-Reihen ausführlich dokumentiert (BELZ ET AL. 2008). Dabei ist diese mangelnde Qualität keineswegs auf Änderungen der physikalischen Rahmenbedingungen, wie sie bezüglich der Talsperrenwirkungen deutlich im LABEL-Projekt (BFG 2012) oder im vorangegangenen Kapitel herausgestellt wurden, zurückzuführen: Festzustellen waren insgesamt Implausibilitäten und Bilanzfehler im Längsprofil, welche es unmöglich machten, die hydrologische und die morphologischhydraulische Entwicklung des Elbstroms seit Ende des 19. Jahrhunderts in stichhaltiger Weise nachzuvollziehen (vgl. bspw. Abb. 1-2).

> Das angesichts dieser Defizite durch die BfG initiierte Projekt "W-Q Elbe 1890" wurde an das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vergeben (HELMS ET AL. 2013, HELMS ET AL. 2016A, HELMS ET AL. 2016B). Ziel der dortigen Arbeiten, die für das im vorliegenden Bericht dokumentierte Homogenisierungsprojekt eine bedeutende Rolle spielen (s. u.), war die Qualitätsverbesserung und Vervollständigung der Abflusskurven bzw. -tafeln für hydrologisch relevante Pegel an der deutschen Binnenelbe im Zeitraum 1890 bis 2006. Im Zuge dieses Vorhabens wurde nicht nur allein die Ursache für die bisherigen Qualitätsprobleme untersucht, sondern die hydrologische Datenbasis an der Elbe auf verlässlichere "neue Füße gestellt". Die nun erfolgten Arbeiten zur Homogenisierung der langen HQ-Reihen hinsichtlich der Talsperrenwirkungen und die zugehörigen statistischen Berechnungen wurden deshalb nicht nur für die existierenden langen HQ-Reihen, sondern auch für die "neuen", durch das KIT erstellten HQ-Reihen durchgeführt. Für jeden maßgeblichen Pegel an der Elbe standen somit zwei nicht homogenisierte HQ-Reihen der Periode 1890-2013 zur Verfügung:

 "Offizielle Daten" (OD), die auf den im HQ(T)-Abstimmungsprojekt (dokumentiert im Bericht BfG-1589) erstellten Datenreihen für die Pegel Dresden, Barby, Wittenberge und Neu Darchau beruhen. Diese wurden bis zum Jahr 2013 mit routinemäßig plausibilisierten Originaldaten der Pegelbetreiber verlängert. Zusätzlich werden für die Pegel Torgau, Lutherstadt-Wittenberg, Aken, Magdeburg-Strombrücke und Tangermünde regressionsgestützte Verlängerungen der HQ-Reihen bis zurück ins Jahr 1890 berücksichtigt, die (mit Ausnahme von Torgau) im Bericht BfG-1589 aus

der hochwasserstatistischen Bearbeitung wegen unzureichender Datenqualität herausgenommen wurden (vgl. BELZ ET AL. 2008).

• "Projektdaten" (WQE) aus dem BfG-Projekt "W-Q Elbe 1890": Die hieraus begründeten HQ-Reihen werden mit dem Kürzel "WQE" bezeichnet; bis zum Jahr 2013 wurden sie ebenfalls mit routinemäßig plausibilisierten Originaldaten der Pegelbetreiber verlängert.

Für die weitere Bearbeitung im vorliegenden Projekt standen aus dem Vorhaben "W-Q Elbe 1890" zwei alternative HQ-Reihen zur Auswahl:

- Version (a) mit erfolgter Eisbereinigung und bereits homogenisiert im Hinblick auf die Annahme standsicherer Deiche sowie mit Elimination weiterer scheitelbeeinflussender Effekte (s. u.),
- Version (b) nur mit erfolgter Eisbereinigung.

Der Autor gibt im Projektbericht zu "W-Q Elbe 1890" (HELMS ET AL. 2016B, S. 368) in diesem Zusammenhang an, dass die im Projekt in Version (a) vorgenommene Homogenisierung und Elimination in erster Linie für große Hochwasserereignisse aussagekräftig ist. Im Umkehrschluss besteht damit für die Mehrzahl der Hochwasser (nämlich für diejenigen in kleinerer und mittlerer Größenordnung) keine gute Eignung. Konkret sprechen folgende der im Projekt "W-Q Elbe 1890" vereinfachend getroffenen Annahmen gegen eine Verwendung der HQ-Reihen der Version (a):

- *Die Havelniederung ist seit 1890 gegen Hochwasser aus der Elbe abgeriegelt:* de facto ist dies erst ab 1954 mit Fertigstellung des Wehrs Neuwerben der Fall.
- Der Havelzufluss bei Elbe-Hochwassern ist seit 1890 konstant 0 m³/s: der individuelle Beitrag der Havel zum jeweiligen Elbescheitel ist angesichts der Gefälleverhältnisse schwer bestimmbar, jedoch ist ein dezidierter "Nullzufluss" gesichert nur für die beiden Hochwasser der Jahre 2002 und 2013 wegen der Havelpolderflutung (vgl. Kap. 2.3.1 und Kap. 2.3.4 sowie Abb. 9-5) anzunehmen.
- Die Karthaneniederung ist seit 1890 gegen Hochwasser aus der Elbe abgeriegelt: de facto ist dies erst seit 1980 Realität.
- *Die Löcknitzniederung ist seit 1890 gegen Hochwasser aus der Elbe abgeriegelt:* de facto ist dies erst seit 1972 der Fall.
- Die Parametrisierung des im Vorhaben zum Hochwasser-Routing verwendeten Translations-Diffusions-Modells erfolgte mit den heutzutage gültigen Parametern ohne eine explizite Modellkonfiguration für den "historischen Zustand".

Insgesamt erscheint die zuvor beschriebene Vorgehensweise mitsamt den getroffenen vereinfachenden Annahmen für die Ansprüche des Berichts HELMS ET AL. (2016B) durchaus akzeptabel, für die im vorliegenden Bericht beschriebene Aufgabenstellung (d. h. die Ermittlung statistischer Hochwasserabflüsse) jedoch zu spekulativ. Letztlich gibt es keinen Beleg für ihre verbesserte (im Übrigen auch nicht für ihre verschlechterte) Zuverlässigkeit gegenüber der

> bislang zur Abschätzung (und Bereinigung) der eintretenden Retentionseffekte unterhalb von Barby verwendeten sogenannten "BTU-Faustformel" (vgl. auch BELZ ET AL. 2008, S. 18f.). Diese wurde in der Vergangenheit verwendet, um Retentionseffekte unterhalb der Saalemündung in den HQ-Reihen verlässlicher abbilden zu können. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit der HQ-Daten aus dem Projekt WQE und der offiziellen Daten (OD) erfolgte daher in diesem Projekt die Entscheidung zur Verwendung der WQE-Daten in Version b), die anschließend - wie auch die OD-Serien in BELZ ET AL. (2008) - für die weiteren extremwertstatistischen Berechnungen mit der zuvor beschriebenen Faustformel überarbeitet wurden (s. u.).

> Eine Prüfung der Reaktion eines Systems auf unterschiedliche Rahmenbedingungen (bspw. den Betrieb der Talsperren im Einzugsgebiet) setzt Einheitlichkeit im methodischen Vorgehen voraus, soweit dies möglich und sinnvoll ist. Das bedeutet, dass die Grundzüge einer Vorgehensweise unverändert bleiben, aber bestimmte Bausteine als Variable modifiziert werden. Da im vorliegenden Fall die aktuell gültigen HQ-Reihen als Bezugsbasis dienen, war das seinerzeit für Bericht BfG-1589 gewählte methodische Vorgehen (BELZ ET AL. 2008) zur Schaffung einer Datenbasis für die extremwertstatistischen Berechnungen gleichermaßen auf die verlängerten inhomogenen HQ-Reihen OD und auf die inhomogenen HQ-Reihen WQE anzuwenden. Nur so kann schlussendlich herausgearbeitet werden, wie sich die Daten aus dem Bericht BfG-1589 unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Reihenverlängerung, talsperrenbezogene Homogenisierung, verbesserte Daten aus dem Projekt "W-Q Elbe 1890") verhalten. Die beiden für das vorliegende Projekt zur Verfügung stehenden Datenreihen OD und WQE wurden deshalb wie folgt angepasst:

- Die gemessenen deichbruchbeeinflussten (aber nicht diesbezüglich bereinigten) WQE-HQ-Werte des Jahres 1890 werden, entsprechend dem Vorgehen bei Erstellung des Berichts BfG-1589, nur am Pegel Torgau bereinigt. Letztlich liegt der OD-Wert bei 4.370 m³/s und der WQE-Wert bei 3.540 m³/s. Dieses Vorgehen birgt allerdings aus hydrologischer Sicht wesentliche Schwächen (v.a. die unvollständige Bereinigung - Deichbrüche wären vermutlich auch stromab in den HQ-Werten spürbar; vgl. hierzu Kap. 12.5).
- 2. Für das Ereignis vom August 2002 erfolgt eine Korrektur der HQ-Werte beider oben genannter Reihen gemäß Bericht BfG-1587 (BUREK 2008, vgl. Tab. 3-1): Die dort berechnete Differenz der WAVOS-Simulationsergebnisse mit und ohne Deichbrüche, die durch die SOBEK-Modellierungen für den vorliegenden Bericht bestätigt werden, werden zum jeweiligen pegelbezogenen Messwerten hinzu addiert. Nach heutigen Erkenntnissen hatte man im Bericht BfG-1589 noch den methodischen Fehler begangen, die Messwerte direkt gegen modellierte Werte auszutauschen. In dieser Hinsicht wird somit für aus Fehlerkorrekturgründen vom damaligen Vorgehen abgewichen.

Pegel	Scheitelabfluss mit Deichbrüchen und Flutung der Havelniederung	Scheitelabfluss ohne Deichbrüche und ohne Flutung der Havelniede-	Differenz zwischen Abfluss mit/ohne Deich- brüche	
	$[m^{3/s}]$	rung [<i>m³/s</i>]	$[m^{3/s}]$	
Dresden	4.645	-	-	
Torgau	4.301	4.416	115	
Wittenberg	4.064	4.377	313	
Aken	4.094	4.603	509	
Barby	4.190	4.667	477	
Tangermünde	4.104	4.597	493	
Wittenberge	3.812	4.489	677	
Neu Darchau	3,555	4,381	826	

Tabelle 3-1: Vergleich der Scheitelabflüsse mit und ohne Deichbrüche(n) an wichtigen Elbepegeln
 beim Hochwasser 2002 (Simulationsrechnungen mit WAVOS nach BUREK (2008))

- 3. Über die in den Punkten 1 und 2 genannten Fälle hinaus, erfolgen Retentionsbereinigungen nur nach dem Ansatz der (nur für die Pegel Wittenberge und Neu Darchau, aber nicht für die eigentlich potenziell ebenfalls von Retention betroffenen Pegel Magdeburg und Tangermünde entwickelten) BTU-Faustformel (vgl. GRÜNEWALD ET AL. 2006 sowie BELZ ET AL. 2008): Jahreshöchstabflüsse am Pegel Wittenberge, die zu denen des Pegels Barby eine Differenz von mehr als 300 m³/s aufweisen, werden nur um diesen Differenzbetrag angehoben: HQ(a) Wittenberge = HQ(a) Barby -300 m³/s. Für Neu Darchau wird ein auf 470 m³/s erhöhter Ansatz veranschlagt: HQ(a) Neu Darchau = HQ(a) Barby - 470 m³/s. Diese Differenzbeträge wurden durch GRÜNEWALD ET AL. (2006) nach Anwendung des Modells WAVOS für das Hochwasser vom August 2002 ermittelt (wobei ein Szenario ohne Deichbrüche und ohne Havelpolder-Flutung angenommen wurde) und als potenzielle Maximalwerte von Retentionseffekten (unter Annahme standfester Deiche und Abriegelung der Havel) zur Anwendung auf historische Ereignisse vorgeschlagen.
- 4. Für das Hochwasser vom Juni 2013 werden die retentionsbereinigten Scheitelabflüsse gemäß IKSE (2014, S. 36 in Verbindung mit dortiger Fußnote 6) verwendet. Die durchgeführten Modellierungen mit dem SOBEK-Modell der BfG (vgl. Kap. 7 und 10), bestätigen die mit ihnen implizierten Effekte durch Deichbrüche und Havelpolderflutung in ihrer Größenordnung. Tabelle 3-2 zeigt in der Spalte "Maßgeblicher Scheitelabfluss" die für die HQ-Reihen OD und WQE ausgewählten Werte.

Pegel	Nomineller Scheitelabfluss (¹ durch Retention beeinflusst)	Maßgeblicher Scheitelabfluss (*ggf. homogenisiert)	Wiederkehrintervall des maßgeblichen Scheitelabflusses
	$[m^3/s]$	$[m^3/s]$	[Jahre]
Dresden	3.950	3.950	50-100
Torgau	4.090	4.090	50-100
Barby	5.250	5.250	100-200
Wittenberge	4.330 ¹⁾	4.950*	100-200
Neu Darchau	4.080 ¹⁾	4.780*	100-200

Tabelle 3-2: Wiederkehrintervalle und zugehörige Durchflüsse für die Pegel Dresden, Torgau, Barby, Wittenberge und Neu Darchau beim Elbe-Hochwasser 2013 (nach IKSE 2014, S. 36)

Abbildung 3-4 zeigt beispielhaft eine Gegenüberstellung der HQ-Reihen auf Basis der - wie zuvor beschrieben - angepassten OD- und WQE-Scheitelabflüsse für den Pegel Wittenberge.



Abbildung 3-4: Vergleich der langen HQ-Reihen auf Basis der OD- und der WQE-Scheitelabflüsse für den Pegel Wittenberge

Deutlich wird, dass die HQ-Reihen auf Basis offizieller Daten (OD) insbesondere in historischer Zeit teils deutlich über den qualitätsverbesserten HQ-Reihen mit Daten des Projekt "W-Q-Elbe 1890" liegen. Mit Ausnahme vom Pegel Tangermünde tritt dieser scheitelmindernde Effekt ereignisbezogen an allen analysierten Elbepegeln auf. Eine vollständige tabellarische Gegenüberstellung der beiden inhomogenen HQ-Reihen findet sich für alle neun zu bearbeitenden Pegeln in Anlage 6.

Untersucht man die Abflussunterschiede in den beiden Datenserien auf gemittelter Basis, indem die jeweiligen MHQ(OD) und MHQ(WQE) der Bezugsperiode 1890 bis 2013 einander gegenübergestellt werden, ergibt sich ein ähnliches Bild; allerdings fällt das MHQ(WQE) nun nicht allein am Pegel Tangermünde, sondern auch am Pegel Magdeburg-Strombrücke höher aus (vgl. Tab. 3-3).

Tabelle 3-3: Abweichungen der MHQ (Bezugsperiode 1890-2013) der "WQE"-Datenserien von den OD-Datenserien (beiden Datenserien nicht homogenisiert)

Pegel	MHQ – OD	MHQ – WQE	Differenz
	$[m^3/s]$	$[m^3/s]$	[%]
Dresden	1.578	1.520	-3,70
Torgau	1.543	1.489	-3,53
Wittenberg	1.515	1.482	-2,12
Aken	1.805	1.681	-6,87
Barby	2.133	2.038	-4,48
Magdeburg	1.973	2.005	+1,65
Tangermünde	1.967	2.006	+1,98
Wittenberge	2.079	2.030	-2,35
Neu Darchau	2.039	1.978	-3,00

Die so erzeugten HQ-Datenreihen dienten als Grundlage für die anschließenden Homogenisierungsrechnungen auf die Zustände "2013" (in der gesamten Bezugsperiode durchgängig wirkenden Talsperrenretention) und "1890" (in der gesamten Bezugsperiode keine Talsperrenretention). Bundesanstalt für Gewässerkunde

> Bericht BfG-1938

4 Vorgehensweise und Arbeitsschritte

Seit den richtungsweisenden Untersuchungen der HSK am Rhein in den 1970er-Jahren (HSK 1978, vgl. Kap. 3.1) ist in Deutschland Stand der Technik, inhomogene lange HQ-Reihen in großen Flusseinzugsgebieten mittels Einsatz überregionaler mathematischer Abflussmodelle zu homogenisieren. Zustandsbezogene Modellsysteme bilden hierfür die zentralen Berechnungsinstrumente, um die instationären Wirkungen von bedeutsamen Ausbaumaßnahmen auf Hochwasserabläufe und Scheitelabflüsse zu quantifizieren. Prinzipiell werden für die Beseitigung der Inhomogenitäten mindestens zwei verschiedene Modellzustände benötigt - in der Regel werden jedoch sogar drei Modellzustände zur Anwendung gebracht (siehe folgenden Abschnitt; vgl. auch Kap. 10 und 11).

Für den die Inhomogenität verursachenden, durch Baumaßnahmen (im Falle des vorliegenden Projekts sind dies Talsperren) stark veränderten Gewässerzustand muss ein kalibriertes Abflussmodell vorliegen, das den Hochwasserablauf zum jeweiligen Eintrittszeitpunkt des Ereignisses abbilden kann. Ebenso wird ein Modell für den heutigen Gewässerzustand benötigt, wenn die homogenen, langen HQ-Reihen die aktuelle Maßnahmenwirkung vollständig berücksichtigen müssen. Sollen die Effekte der Retentionsmaßnahmen aus den inhomogenen HQ-Reihen eliminiert werden, dann wird ein weiteres Modell für den natürlichen unbeeinflussten Gewässerzustand benötigt. Alle Modelle sollten vergleichbare Qualitätsstandards erfüllen.

Im Fall des hier beschriebenen Vorhabens müssen zum Nachweis der Wirkung der Talsperren in Tschechien und Thüringen (vgl. Kap. 2.4) mathematische Modelle unterschiedlicher Zustände für Moldau, Eger und Obere Saale zur Verfügung stehen. Während für Moldau und Eger diese Voraussetzungen im Projekt erfüllt wurden (KAŠPÁREK ET AL. 2006, BFG 2012, BALVÍN ET AL. 2017; vgl. Kap. 7.1), stand für die Saale im Bereich der Saalekaskade kein adäquates Modell bereit. Die Effekte der beiden Talsperren im Oberlauf der Saale in Thüringen lassen sich aufgrund des räumlich konzentrierten Veränderungsbereichs durch Bilanzbetrachtungen jedoch hinreichend genau auf Hochwasser am Pegel Kaulsdorf parametrisieren (vgl. Kap. 7.2.1, siehe auch TLUG 2015). Kaulsdorf liegt unmittelbar unterhalb der Talsperren und wird als Eingangspegel des gekoppelten Saale-Elbe-Modells der BfG (Kap. 7.2.2 und 7.2.3) verwendet.

Nicht jeder in der inhomogenen Zeitreihe 1890-2013 aufgeführte jährliche Höchstabfluss (HQ-Wert) für die untersuchten deutschen Pegel an der Elbe kann jedoch, entsprechend des in Kapitel 3.2 beschriebenen tschechischen Verfahrens, mittels Modellen in einen homogenen

> Zustand umgerechnet werden. Gemäß den Layouts der Modelle für Elbe, Moldau, Eger und Saale werden für die instationären Simulationsberechnungen die Abflussganglinien aller bedeutsamen Zuflüsse benötigt, um die Hochwassergenesen in ihren zeitlichen und räumlichen Ausprägungen mit den Modellen gut abbilden zu können. Somit ist die Verfügbarkeit von hydrologischen Daten der wesentliche, limitierende Faktor der gesamten Untersuchung. Zwar existieren in Deutschland für die Elbepegel i. d. R. lange Beobachtungsreihen gemessener Wasserstände und Abflüsse (vgl. Kap. 3.3), jedoch ist dies für die Pegel an den benötigten Zuflüssen bei Weitem nicht gegeben. Teilweise reichen die langen Beobachtungsreihen der Zuflusspegel nicht weit genug zurück (bspw. für Pegel Laucha (Unstrut) nur bis 1940) oder vormals existierende Pegelschriebe bzw. Beobachtungslisten sind heute nicht mehr auffindbar (siehe Kap. 8.2).

> Die im Rahmen des Vorhabens eingesetzte Vorgehensweise der HSK umgeht dieses Problem, indem über eine Auswahl nachgerechneter Hochwasser (Kap. 5) statistisch gesicherte Beziehungen zwischen berechneten Scheitelabflüssen verschiedener Gewässerzustände hergestellt werden (Kap. 11). Im Weiteren dienen diese dann als Umrechnungsvorschriften zur Generierung homogener HQ-Reihen. Zur Realisierung dieses Verfahrens mussten im Wesentlichen sieben Bearbeitungsschritte (Arbeitspakete) umgesetzt werden. Diese werden im Folgenden in Kürze beschriebenen – eine umfassende, detaillierte und arbeitspaketbezogene Darstellung der jeweiligen Methodik, Auswertung und der Ergebnisse ist den Kapiteln 5 bis 12 zu entnehmen.

ARBEITSPAKET 1: Auswahl von charakteristischen Elbehochwassern (Kapitel 5)

Für die Simulationsberechnungen mit den mathematischen Modellen wurden von der das Projekt begleitenden Expertengruppe 30 charakteristische Elbehochwasser zwischen 1970 und 2013 ausgewählt. Diese Ereignisse stammen somit alle aus der Zeit nach Inbetriebnahme der großen Talsperren in Tschechien und Thüringen und repräsentieren eine große Bandbreite unterschiedlicher Hochwassergenesen. Das Kollektiv beinhaltet sowohl kleine, unschädliche (< MHQ) als auch extreme Hochwasserereignisse, bspw. der Jahre 2002 und 2013. Die Auswahl umfasst Winter- und Sommerhochwasser sowie Ereignisse, deren Hauptentstehungsgebiete in verschiedenen Regionen im Elbegebiet liegen. Detailliertere Ausführungen zu den Kriterien, die zur Auswahl der 30 charakteristischen Hochwasser führten, und zum gewählten Kollektiv finden sich in Kapitel 5.

ARBEITSPAKET 2: Festlegung der Berücksichtigung maßgeblicher Talsperren bei der Homogenisierung (Kapitel 6)

Aus vorangegangenen Projekten liegt ein umfangreicher Wissensschatz zur generellen Wirkung der tschechischen Talsperren (KAŠPÁREK ET AL. 2006, BFG 2012) bereits vor. Spezifische Kenntnisse zum Einsatz einzelner Talsperren können den Analysen abgelaufener Hochwasser (IKSE 2004, IKSE 2007, IKSE 2014, TLUG 2015, BFG 2013) entnommen werden.
Anhand verschiedener Kriterien (bspw. der Größe des Rückhalteraums im Verhältnis zur bestimmten Eigenschaften des Einzugsgebiets), der Möglichkeit zur Vorentleerung von Talsperren im Winterhalbjahr und des tatsächlichen Beitrags der Talsperren bei abgelaufenen Hochwassern wurden diejenigen Talsperren identifiziert, die in der Modellierung und Auswertung berücksichtigt werden sollen. Da bei der Auswahl zwischen Talsperren unterschieden wurde, die generell für alle analysierten Ereignisse bedeutend sind, und solchen, die nur bei ausgewählten Ereignissen in die Modellierung zu integrieren sind (BALVÍN ET AL. 2017), kann die Anzahl der in der Modellierung betrachteten Talsperren bei jedem untersuchten Hochwasser verschieden sein. Ausführliche Erläuterungen hierzu erfolgen in Kapitel 6.

ARBEITSPAKET 3: Aufbau zustandsbezogener Modellsysteme (Kapitel 7)

Vergleichbar mit den Simulationsberechnungen im EU-Projekt "LABEL" wurden auch im hier beschriebenen Vorhaben arbeitsteilig die Modellberechnungen in Tschechien vom Institut für Wasserforschung (VÚV TGM) und in Deutschland von der BfG ausgeführt (BFG 2012). Das VÚV TGM beauftragte zu diesem Zweck das Consulting-Büro AQUALOGIC, das für das Moldau-, Eger- und Elbegebiet in Tschechien die entsprechenden Abflussmodelle für Gewässerzustände mit und ohne Talsperren bereithielt bzw. aufbaute und kalibrierte sowie im Rahmen der Untersuchungen einsetzte. Der Pegel Ustí nad Labem markiert die Schnittstelle zwischen dem tschechischen Modellsystem und dem SOBEK-Modell der BfG. Weitere Informationen zu den eingesetzten Modellwerkzeugen finden sich im Kapitel 7.

ARBEITSPAKET 4: Aufbereitung der Messdatengrundlage für die Übernahme in die hydraulische Modellierung (Kapitel 8)

Die Bereitstellung von möglichst hoch aufgelösten Abflussganglinien für Elbe- und Nebenflusspegel für 30 ausgewählte Hochwasserereignisse zwischen 1970 und 2013 gehörte zu den wichtigsten und aufwandintensivsten Bearbeitungsschritten im Projekt. Insgesamt waren für die großräumige Abflussmodellierung Messdaten an 48 Pegeln im deutschen Elbegebiet gemäß den Layouts des Elbe- bzw. des Saalemodells erforderlich. Lagen Pegeldaten in der geforderten, hohen zeitlichen Auflösung in der BfG nicht digital vor, war eine Digitalisierung von analogen Aufzeichnungen an den Pegeln (Wasserstandsganglinien) zu veranlassen. Alle Daten waren zu plausibilisieren und hinsichtlich ihrer weiteren Verwendung zu prüfen. Für das deutsche Elbegebiet wird dieser Prozess ausführlich in Kapitel 8.2 beschrieben, für den tschechischen Teil des Elbegebiets erfolgt ein kurzer Abriss in Kapitel 8.1.

ARBEITSPAKET 5: Bewertung weiterer Einflüsse auf den Hochwasserablauf (Kapitel 9)

Die in Kapitel 2.3 diskutierten Abläufe wichtiger Hochwasser der jüngeren Vergangenheit zeigen auf, dass über die Wirkung der Talsperren hinaus weitere scheitelreduzierende Retentionseffekte auftreten können, wenn große Überschwemmungsgebiete (bspw. an den Mündungen von Moldau und Eger in die Elbe in Tschechien oder an der unteren Mittelelbe in Deutschland) bei Hochwassern beaufschlagt werden. Vor dem Hintergrund, dass seit 1890

> zahlreiche Überschwemmungsflächen an der Elbe eingedeicht und einmündende Nebenflüsse bei Hochwasser vor Rückstau geschützt wurden (SIMON 1996), stellte sich die Frage, ob die durch Talsperren verursachten Veränderungen die einzigen nennenswerten Quellen für die Inhomogenität der langen HQ-Reihen darstellen. Kapitel 9 beschreibt hierzu die in einem begleitenden Projekt durchgeführte Datenerhebung zu den seit 1890 verlorenen und wiedergewonnenen Überschwemmungsflächen und stellt im Rahmen exemplarischer modellbasierter Wirkungsabschätzungen das mögliche Ausmaß sowie die (zukünftigen) Möglichkeiten und (derzeitigen) Grenzen der Berücksichtigung solcher Effekte in der Homogenisierung dar. Dabei wird auch auf die Ergebnisse weiterer aktueller Studien der BfG zu verwandten Themen eingegangen.

ARBEITSPAKET 6: Durchführung von zustandsbezogenen Simulationsberechnungen (Kapitel 10)

Auf Basis der Kenntnisse über die für den Hochwasserablauf und die Scheitelabflüsse maßgeblichen Talsperren (Arbeitspaket 2) und der Relevanz weiterer Einflüsse (Arbeitspaket 5) wurden für alle ausgewählten 30 Hochwasser (Arbeitspaket 1) und verschiedene Gewässerzustände mit unterschiedlicher Beeinflussung durch Talsperren mit den zur Verfügung stehenden Modellen (Arbeitspaket 3) Simulationsberechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellierungen werden in Kapitel 10 vorgestellt. Diese Untersuchungen beinhalten auch Modellberechnungen anhand des zusammengestellten Datenkollektivs der 30 Hochwasser zur Verifizierung dieser Hochwasser an Elbepegeln.

ARBEITSPAKET 7: Ableitung von Transformationsvorschriften und Erstellung homogener HQ-Reihen 1890-2013 (Kapitel 11)

Aus den Simulationsberechnungen liegen für das ausgewählte Hochwasserkollektiv für verschiedene untersuchte Gewässerzustände mit/ohne Talsperren zustandsbezogene Scheitelabflüsse vor, die danach mittels Regressionsbeziehungen in einen statistischen Zusammenhang gebracht werden. Zur Ableitung der Transformationsfunktionen werden ausschließlich die mit den Abflussmodellen ermittelten zustandsbezogenen Scheitelabflüsse berücksichtigt; gemessene Scheitelwerte werden in diesem Zusammenhang nicht mehr benötigt. Mit Hilfe dieser Transformationsfunktionen werden im letzten Schritt zur Erzeugung homogener HQ-Reihen schließlich die jährlichen Ereignisse der inhomogenen Teilreihe in den jeweils zur Homogenisierung benötigten Gewässerzustand umgerechnet. Im Fall der Elbe sind dies die Zustände "ohne Talsperren (1890)" und "mit Talsperren (2013)". Die Umrechnung erfolgt für neun Elbepegel sowohl für die Scheitelabflüsse auf Basis der offiziellen Abflusskurven (OD) als auch auf Basis der Daten des Projekts "W-Q-Elbe 1890" (WQE). Zusammen mit den beiden inhomogenen HQ-Reihen (vgl. Kap. 3.3) ergeben sich somit aus dem Projekt insgesamt sechs lange HQ-Reihen, für die im Zuge von Arbeitspaket 8 extremwertstatistische Berechnungen durchzuführen sind. Die Ableitung der Transformationsfunktionen, Variantenstudien und Sensitivitätsanalysen für verschiedene Möglichkeiten zu deren Berechnung und Anwendung, sowie die homogenen Reihen als Ergebnisse der Transformation werden in Kapitel 11 ausführlich beschrieben.

ARBEITSPAKET 8: Extremwertstatistische Berechnungen für deutsche Elbepegel auf Grundlage homogener Reihen 1890-2013 (Kapitel 12)

Für die zu Grunde liegenden inhomogenen sowie die erzeugten homogenen HQ-Reihen sind extremwertstatistische Berechnungen für neun deutsche Elbepegel durchzuführen. Dabei kommen entsprechend der Vorgehensweise der FGG-Arbeitsgruppe "Erstellung einer länderübergreifenden Hochwasserstatistik für die Elbe" (BELZ ET AL. 2008) verschiedene Verteilungsfunktionen zum Einsatz, deren Güte und Verwendbarkeit plausibilisiert werden muss. Dies erfordert sowohl pegelbezogene Auswertungen der HQ-Statistiken als auch eine pegelübergreifende Sicht im Längsschnitt der Elbe. Wesentliche Ergebnisse sind Empfehlungen für neue HQ-Statistiken auf Basis der Projektergebnisse sowie die ermittelten Spannweiten zwischen den statistischen Extremwerten für Zustände mit und ohne Talsperren. Letztere geben Auskunft darüber, in welchem Ausmaß die von Elbehochwasser betroffenen Unterlieger heute von den Talsperren der Oberlieger in Tschechien und Thüringen profitieren. Zudem können die statistischen Extremwerte zur Überprüfung bzw. Aktualisierung aktuell gültiger Bemessungsabflüsse verwendet werden.

Abbildung 4-1 illustriert die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitsschritten im Projekt nochmals mit Hilfe einer schematischen Darstellung.



Abbildung 4-1: Schematische Übersicht über die Abfolge der Arbeitsschritte im vorliegenden Projekt

Bundesanstalt für Gewässerkunde

> Bericht BfG-1938

5 Wahl von 30 charakteristischen Hochwassern

Das anzuwendende Verfahren zur Homogenisierung der HQ-Reihen für deutsche Elbepegel wurde mit seiner generellen Vorgehensweise und den einzelnen Arbeitsschritten bereits in Kapitel 4 erläutert. Die Methode sieht vor, zum Zweck der Homogenisierung aller Scheitelabflussreihen an deutschen Elbepegeln seit 1890, auf eine Auswahl von 30 Hochwasserereignissen des Zeitraums ab 1968 bis 2013 zurückzugreifen. Die Verhältnisse wurden für diesen Zeitraum zu Projektbeginn als weitestgehend homogen erachtet, da ab 1968 bereits alle großen Talsperren im Elbegebiet gebaut und in Betrieb waren. Außerdem war zu vermuten, dass für Ereignisse dieses Zeitraums am ehesten noch komplette Messwertdatensätze für alle in der Modellierung benötigten Pegel (als Modelleingangs- bzw. Auswertepegel) zur Verfügung stehen bzw. rekonstruierbar sind. Diese Ereignisse können dann mit den vorliegenden Modellsystemen unter der Zugrundelegung unterschiedlicher historischer Ausbauzustände nachgerechnet und daraus Transformationsfunktionen für alle gemessenen Scheitelabflüsse seit 1890 abgeleitet werden.

Die Auswahl der zu modellierenden Hochwasser stellte somit eine der wichtigsten Grundlagen für eine erfolgreiche Durchführung des Projekts dar. An die Gesamtmenge der auszuwählenden Hochwasser wurden nach Abstimmung in der projektbegleitenden Expertengruppe folgende Anforderungen gestellt:

- Die ausgewählten Hochwasser sollen möglichst die Bandbreite aller im tschechischen Einzugsgebiet typischen Hochwassergenesen (vgl. Kap. 2.3) abbilden. Dabei wird zwischen Sommer- und Winterereignissen sowie zwischen Hochwassern, die durch die Abflüsse aus dem Moldaugebiet oder aus dem Gebiet der Oberen Elbe in Tschechien dominiert werden, unterschieden. Es ergeben sich somit für die Auswahl vier verschiedene Klassen.
- Die Zusammenstellung der Hochwasser soll so erfolgen, dass in jeder Klasse für jeden Elbepegel in Tschechien und Deutschland an der Elbe durch die vorgenommene Auswahl die gesamte Abflussbandbreite zwischen kleinen Ereignissen (~ MHQ) und sehr großen Ereignissen (HQ_{extrem}, soweit möglich) abgedeckt wird. Dabei ist es wichtig, dass die gewählten Ereignisse über die Spannweite des Abflusses gleichmäßig verteilt sind. Es soll beispielsweise vermieden werden, dass sich die ausgewählten Ereignisse nur am oberen oder unteren Rand der Spannweite konzentrieren.
- Jede Klasse muss über eine hinreichende Anzahl (> 5) von Repräsentanten verfügen, um verlässliche Regressionsbeziehungen zwischen den Scheitelabflüssen der verschiedenen Zustände ableiten zu können.

> • Da der Fokus des Gesamtprojekts nicht nur auf der Homogenisierung der Scheitelabflüsse hinsichtlich der Wirkung der tschechischen Talsperren liegt, sondern auch die Einflüsse des thüringischen Talsperrensystems an der Saale Berücksichtigung finden sollen, wurde bei der Hochwasserauswahl darauf geachtet, dass die zuvor genannten Kriterien (Ereignistyp, Bandbreite, homogene Verteilung) durch die gewählten Ereignisse auch für die Saale erfüllt werden.

Die Festlegung der zu modellierenden charakteristischen Hochwasser erfolgte in einem zweistufigen Verfahren: Die Erstauswahl wurde durch das Tschechische Hydrometeorologische Institut (ČHMÚ) vorgenommen, das auf der 2. Sitzung der Expertengruppe im Dezember 2013 in Prag einen Vorschlag von 25 Ereignissen präsentierte. In Tabelle 5-1 werden die gewählten Hochwasser hinsichtlich ihrer Klassifizierung und mit Angabe der gemessenen Scheitelabflüsse und Jährlichkeiten an den Pegel Prag-Chuchle (Moldau) und Kostelec (Elbe oberhalb Moldaumündung) beschrieben. Diese Liste wurde von der BfG hinsichtlich der zuvor beschriebenen Auswahlkriterien bewertet und, teilweise auf Anregung der Expertengruppe, ergänzt (in Tabelle 5-1 rot markierte Zeilen).

Anhand der exemplarischen Darstellung für den Pegel Wittenberge soll in Abbildung 5-1 der Auswahlprozess nochmals erläutert werden. Dort sind auf der Abszisse die vier bereits beschriebenen, typischen Hochwassergenesen (Klassen) aufgetragen. Auf der Ordinate findet sich jeweils der Scheitelabfluss. Es werden ergänzend die wichtigsten statistischen Hauptund Extremwerte zur groben Einordnung angegeben (BFG 2009):

- In einem ersten Schritt wurden alle Jahreshöchstwerte des Abflusses seit 1890 einer der vier Hochwassergenesen zugeordnet und im Diagramm mit ihrem gemessenen Scheitelabfluss eingetragen (graue Punkte). Näheres zu den auftretenden Schwierigkeiten bei der Zuordnung der Werte der HQ-Reihe zu einer der vier Hochwassergenesen wird in Kapitel 11.2.2 beschrieben.
- Zusätzlich werden die vom ČHMÚ ausgewählten Hochwasser, die nicht zwangsläufig das höchste Ereignis eines jeweiligen Jahres darstellen müssen (und demnach nicht unbedingt Teil der HQ-Reihe sind) in diese vier Klassen einsortiert. Sie sind durch blaue Rauten gekennzeichnet und zeigen das durch sie abgedeckte Abflussspektrum auf.
- Wo (entsprechend der zu Beginn dieses Kapitels vorgestellten Kriterien) Lücken identifiziert werden konnten, wurden diese durch die Hinzunahme weiterer Hochwasser gefüllt (rote Rauten in Abb. 5-1 bzw. rote Zeilen in Tab. 5-1).

Nicht immer war es möglich, die vorhandenen Lücken zu füllen bzw. eine gleichmäßige Verteilung der gewählten Ereignisse über das abzudeckende Abflussspektrum zu erreichen. Dies war immer dann der Fall, wenn die hierfür in Frage kommenden Ereignisse außerhalb des abgedeckten Zeitraums vor 1968 stattgefunden haben somit nicht in einer möglichen Auswahl für eine Modellierung liegen. Deutlich wird dies bspw. in der Klasse "Sommer/Elbe", wo die beiden höchsten Werte Ereignissen aus den Jahren 1926 und 1955 zuzuordnen sind. Eine relativ große Lücke im abgedeckten Abflussspektrum ist in der Klasse "Sommer/Moldau" zwischen HQ_2 und $< HQ_{50}$ zu erkennen, weil auch hier die überwiegende Anzahl der Ereignisse der HQ-Reihe aus dem Zeitraum vor 1968 stammt.



Abbildung 5-1: Einordnung der HQ-Werte und der in einem ersten (blaue Rauten) und einem zweiten (rote Rauten) Arbeitsschritt ausgewählten Hochwasser nach 1968 am Pegel Wittenberge; *dargestellt sind als dunkelgraue Punkte die 123 HQ-Werte (je HQ-Wert ein Symbol) der Jahre 1890-2013 (2002 und 2013 deichbruchbereinigt), eingeordnet in die 4 Klassen der typischen Hochwassergenesen.*

Die auf diesem Weg erfolgte Plausibilisierung der getroffenen Auswahl wurde nicht nur für den Pegel Wittenberge, sondern auch für die tschechischen Pegel Brandýs n. L., Děčín (beide Elbe) und Prag-Chuchle (Moldau) in Tschechien sowie für die Pegelstandorte Dresden und Barby in Deutschland durchgeführt. Für die Hochwasser an der Saale erfolgte eine vereinfachte Plausibilisierung hinsichtlich der Verteilung auf Sommer- und Winterereignisse. Die endgültige Auswahl der 30 Hochwasser, die zur Modellierung und Ableitung von Transformationsfunktionen für die Homogenisierung herangezogen werden, findet sich in Tabelle 5-1. Anhand dieser Tabelle, in der Daten zu den Pegeln Prag-Chuchle, Kostelec, Dresden und Barby zusammengestellt sind, ist auch zu erkennen, dass sich die ausgewählten Hochwasser nicht nur hinsichtlich der Hochwassergenese und der Scheitelhöhe, sondern auch hinsichtlich Abflussfülle und Ereignisdauer (jeweils berechnet ab Überschreitung eines Basiswerts von 3*MQ) deutlich unterscheiden.

Marraser Cenese Scheitel- linhresser Kurzbezeichungi Genese Intititiseit. Amarrasser Jahreszeit. Intititiseit. Amarrasser Jahreszeit. Intititiseit. Amarrasser Jahreszeit. Intititiseit. Amarrasser Jahreszeit. Intititiseit. Amarrasser Marrasser Intititiseit. Juli 1371.A. N. Z703.1970 Juli 1371.A. S. E. 08.61.971 Juli 1371.A. S. E. 0.0.13974 Juli 1397.B. M. Z3.008.1977 Juli 1360 Juli 1390. S. M. Z3.008.1977	n ³ /s) Scheitelhöhe 13314 - △ [a] [a] [a] 14 - △ [a] [a] [a] 14 - △ [a] [a] [a] 14 - △ [a]	r Q > 3 MQ	fülle MQ	Cchaital	əyöı	keit	NG NG	ס ופ		ອເ	ł	J			ę			
Narr 1950 Narr 1970 Narr 1971 <	n ³ /s) [a] 674 <1 674 <1 674 <1 667 <1 1.5 1.5	₩ • M	ssulħdA ຍ< ດ>ມໂ	eintrittszeit- punkt	dlətiədə2	Həihdöl	i E < D ili∮ BDUƏIJƏM	ü†szul†dA M ε < Ω 1ü≹	Scheitel- eintrittszeit- punkt	lödlətiədə2	Jährlichkei	∮מיר ע> 3 אע Mellendaue,	ellü†zzul†dA ΩM ε < Ω 1ü₹	Scheitel- eintrittszeit- punkt	ədödlətiədə2	Jährlichkeit	ער מ> 3 אמ¥ אפוןפּחלםעפעפֿר	ellütszultdA ΩM ε < Ω 1üt
Mär:1970 A W M 27,03,1970 Mär:1970 B* W M 27,03,1970 Mär:1971 B* S E 08,06,1971 Juli 1971 B* S E 08,06,1971 Juli 1971 B* S E 03,03,1974 Juli 1971 B* S E 01,21,1974 Juli 1971 B* S M 23,06,1977 Juli 1971 B* S M 23,06,1977 Juli 1980 S M Z3,07,1980 M Mar:1981 Write 1981 W E 13,03,1981	574 <1 314 <1 667 <1	[d]	[Mio. m³]	[Tag.Monat. Jahr]	[s/ɛm]	[a]	[d]	[Mio. m³]	[Tag.Monat. Jahr]	[s/ɛm]	[a]	[q]	[Mio. m³]	[Tag.Monat. Jahr]	[s/ɛm]	[a]	[p]	[Mio. m³]
März 1970 8* W M Juli 1971 4 5 E 08.06.1971 Juli 1971 8* 5 E 03.06.1971 Juli 1971 8* 5 E 03.06.1974 Juli 1971 8* 5 E 03.06.1974 Juli 1971 8* 5 R 23.08.1974 Juli 1971 8* 5 M 23.07.1980 Juli 1980 5 M 23.07.1981 Marz 1981 W E 13.03.1981		19,0	72	28.03.1970	534	\$	37,5	277	28.03.1970	1390	4	11,0	322	31.03.1970	2334	2-5	13,5	281
Juli 1971 A S E 08.06.1971 Juli 1971 B* S E 08.06.1974 Juli 1971 B* S E 10.1.1974 August 1977 S M E 10.1.1974 Juli 1960 S S M 23.08.1977 Juli 1960 S M E 13.07.1981	314 <1 667 <1 	•	÷	22.04.1970	519	\$	19,5	182	23.04.1970	1330	4	19,5	1403	26.04.1970	2448	2-5	21,0	664
Juli 1971 B* S E December 1974 W E 10.1.2.1974 August 1977 S M 2.3.08.1977 Juli 1980 S M 2.3.07.1981 Marz 1981 W E 1.3.03.1981		•	÷	03.07.1971	572	~2	5,5	55	10.06.1971	746	4	,	,	13.06.1971	1072	4	,	•
Desember 1974 W E 10.12.1974 August 1977 S M Z 10.12.1974 August 1977 S M Z 3.08.1977 1 August 1977 S M Z 3.08.1977 1 August 1991 S M Z 3.07.1981 1 Mar. 1981 W E 13.03.1981 1 10.33.11981 1	667 <1	•	•						04.07.1971	867	4			07.07.1971	1014	4		×.
August 1977 S M 23.08.1977 1 Juli 1980 S M 23.07.1980 1 März 1981 W E 13.03.1981 1	1-5	13,5	130	10.12.1974	862	~5-10	20,0	291	12.12.1974	1980	2-5	15,5	940	14.12.1974	3346	5-10	15,0	954
Juli 1980 S M 23.07.1980 März 1981 W E 13.03.1981	2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	8,0	232	24.08.1977	744	5	7,5	108	26.08.1977	1990	2-5	7,0	393	30.08.1977	1941	4	2,0	36
März 1981 W E 13.03.1981	982 >1	9,0	132	23.07.1980	650	2-5	23,0	187	25.07.1980	1780	2-5	21,0	511	28.07.1980	2142	4	5,0	127
	650 <1	3,5	37	14.03.1981	1214	20-50	20,0	413	15.03.1981	2220	5-10	17,5	837	18.03.1981	3232	5-10	11,0	814
Juli 1981 S M 21.07.1981	i676 ~5	7,0	246	22.07.1981	651	2-5	10,5	68	23.07.1981	2310	5-10	10,0	745	27.07.1981	2251	1-2	6,5	146
Oktober 1981 S E 24.10.1981	415 <1	•	•	24.10.1981	662	2-5	13,0	110	25.10.1981	1320	4	10,0	195	30.10.1981	1591	4		•
Januar 1982 W E 06.01.1982	689	7,5	83	07.01.1982	920	10	6,5	179	08.01.1982	1830	2-5	8,0	543	12.01.1982	2937	°5	9,5	587
Juni 1986 S M 31.05.1986	989 >1	8,0	157	07.06.1986	231	\$			02.06.1986	1420	4	3,5	199	06.06.1986	1721	4	1,5	S
März 1987 A W M 30.03.1987	815 ~1	9,5	196	30.03.1987	661	2-5	7,0	106	31.03.1987	1790	2-5	14,5	1016	02.04.1987	2654	2-5	11,0	536
März 1987 B* W M 12.04.1987	605 <1	5,0	49	07.04.1987	687	2-5	6,5	133	13.04.1987	1680	2-5	7,0	898	13.04.1987	2553	2-5	11,5	522
März 1988 W M 28.03.1988	(250 >1	31,0	670	28.03.1988	747	5	35,5	321	30.03.1988	2250	5-10	26,5	1954	01.04.1988	3214	5-10	26,5	1741
März 1993 W E 19.03.1993	472 <1	<0,5		19.03.1993	555	4	3,5	44	20.03.1993	1100	A	1,5	57	23.03.1993	1190	4		ł
Dezember 1993 W M 22.12.1993	:002 >1	6,5	197	23.12.1993	512	\$	17,5	103	24.12.1993	1684	2-5	11,5	417	28.12.1993	2030	4	5,0	102
April 1994 W E 20.04.1994	351 <1	1	•	14.04.1994	401	\$	2,0	=	16.04.1994	855	4	•		19.04.1994	2106	4	8,0	166
Juli 1997 S E 21.07.1997	437 <1	•	•	21.07.1997	736	2	8,5	139	22.07.1997	1218	4	3,5	165	24.07.1997	1228	4		•
November 1998 W E 02.11.1998	605 <1	6,0	41	03.11.1998	763	5	10,0	215	04.11.1998	1643	2-5	8,0	506	08.11.1998	2310	~2	8,5	277
März 2000 A W E 01.04.2000	768 ~1	21,0	149	12.03.2000	833	~10	25,0	215	13.03.2000	1700	2-5	14,0	803	17.03.2000	2640	2-5	13,5	751
März 2000 B* W E -	•	'	•		•		,	,	02.04.2000	1590	1-2	10,0	1076	05.04.2000	2150	4	12,0	187
März 2001 W M 27.03.2001	594 <1	6,0	31	09.04.2001	344	\$	1,0	2	28.03.2001	1130	4	3,0	111	31.03.2001	1478	4	÷	×
Januar 2002 A W E 30.01.2002	519 <1	3,5	12	30.01.2002	797	5-10	14,0	242	31.01.2002	1660	2-5	11,5	584	03.02.2002	2270	~2	8,0	259
Januar 2002 B* W E 14.02.2002	471 <1	1,0	e	14.02.2002	690	2-5	7,5	152	16.02.2002	1500	4	5,5	604	19.02.2002	1900	4	3,5	45
Januar 2002 C* W E 27.02.2002	524 <1	4,5	24	28.02.2002	677	2-5	11,0	128	01.03.2002	1590	1-2	10,0	946	05.03.2002	2285	~2	7,0	239
August 2002 S M 14.08.2002 S	5160 >100	0 25,0	1967	15.08.2002	507	\$	1,5	18	17.08.2002	4583	<200	11,5	1822	19.08.2002	4290	20-50	10,5	1230
Januar 2003 W M 06.01.2003	020 >1	14,5	472	05.01.2003	784	5	3,5	110	06.01.2003	2010	2-5	14,0	931	09.01.2003	3030	~5	15,0	847
März 2005 W M 19.03.2005	758 <1	11,0	139	20.03.2005	581	~2	12,0	83	20.03.2005	1590	1-2	11,5	558	24.03.2005	2110	4	6,5	139
April 2006 W E 01.04.2006	430 1-5	34,5	697	03.04.2006	1020	~20	23,5	412	04.04.2006	2870	10-20	25,5	2359	04.04.2006	3585	10-20	17,0	1555
August 2006 S E 10.08.2006	407 <1	•	•	09.08.2006	633	2-5	2,0	28	10.08.2006	666	4	<0,5	13	12.08.2006	857	4		•
Dezember 2007 W E 05.12.2007	359 <1	•	•	09.12.2007	515	\$	6,5	37	09.12.2007	1070	4	5,0	67	12.12.2007	1550	4	÷	1
Juni 2009 S M 30.06.2009	797 ~1	15,5	205	03.07.2009	173	8			03.07.2009	962	A	÷		05.07.2009	951	4	÷	÷
September 2010 S E 30.09.2010	311 <1	•	•	29.09.2010	707	2-5	4,5	87	30.09.2010	1360	4	4,0	209	03.10.2010	2270	~2	5,0	182
Januar 2011 W M 15.01.2011	:010 >1	13,0	215	16.01.2011	610	~2	6,0	76	17.01.2011	2280	10-20	12,0	943	19.01.2011	3600	10-20	19,0	1478
Juni 2013 S M 04.06.2013	1040 ~50	27,0	1274	04.06.2013	675	2-5	8,5	<mark>9</mark> 3	06.06.2013	3940	50-100	14,0	1979	09.06.2013	5230	~300	16,0	2226

Tabelle 5-1: Übersicht über wesentliche Merkmale (Scheitelabfluss, Jährlichkeit, Wellendauer, Abflussfülle) für das Kollektiv der 30 ausgewählten Hochwasser an vier Pegeln (*Erläuterungen zur Farbwahl: siehe vorangegangener Text*)

6 Auswahl der für die Modellierung und Homogenisierung maßgeblichen Talsperren

Neben der Festlegung eines repräsentativen Kollektivs von zu modellierenden historischen Hochwassern (Kapitel 5) bildete die Auswahl der für die Homogenisierung relevanten Talsperren in Tschechien eine der Kernaufgaben in der Vorbereitung der Modellerstellung und -anwendung. Kapitel 2.4 gibt bereits einen Überblick über die wichtigsten Talsperren; generelle Regeln zur Steuerung der Bauwerke werden dort exemplarisch anhand abgelaufener Hochwasser erläutert. Da die Talsperren in Tschechien, bspw. in Abhängigkeit von ihrer Steuerung, ihres Rückhalteraums, ihrer Lage im Einzugsgebiet oder der Hochwassergenese, ganz unterschiedliche Einflüsse auf den Hochwasserablauf ausüben können, und es im Rahmen der Modellierung nicht möglich war, alle 136 im tschechischen Elbegebiet realisierten Rückhalteräume > 0,3 Mio. m³ (vgl. Tab. 2-4) zu berücksichtigen, war eine Auswahl der wichtigsten und für die Homogenisierung maßgeblichen Talsperren unerlässlich. Im Gegensatz dazu war bereits zu Projektbeginn bzw. in der Vorhabensbeschreibung (BFG ET AL. 2013) festgelegt worden, dass in Thüringen die Talsperren der Saalekaskade (vgl. Kap. 2.4.3) in die Modellierung zu integrieren sind. Hier musste keine darüber hinaus gehende Festlegung getroffen werden.

6.1 Kriterien zur Wahl der maßgeblichen Talsperren in Tschechien

Aus der Sicht der Hochwasserablaufmodellierung können zwei unterschiedliche Wirkungen von Talsperren unterschieden werden (BALVÍN ET AL. 2017). Zum einen können sie, sofern zu Hochwasserbeginn ausreichend freier Speicherraum zur Verfügung steht, den Hochwasserscheitel durch Volumenrückhalt reduzieren. Ein Beispiel hierfür ist die Talsperre Orlík an der Moldau, der nach dem Gesamtvolumen größte Rückhalteraum in Tschechien. Zum anderen können Talsperren bzw. Ketten von Stauhaltungen bewirken, dass die Hochwasserwellen beschleunigt ablaufen.

In der Vergangenheit beschäftigten sich verschiedene Studien mit der Bewertung des Einflusses tschechischer Talsperren auf Hochwasserscheitel, vornehmlich an wichtigen Pegeln der Moldau und Elbe in Tschechien (HLADNÝ ET AL. 2004, KAŠPÁREK ET AL. 2006, KAŠPÁREK ET AL. 2006A). Dabei wurden im Wesentlichen die Effekte der Moldaukaskade und der Talsperre Nechranice an der Eger untersucht. Diese Talsperren haben nicht nur aufgrund ihres gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraums von heute insgesamt mehr als 160 Mio. m³ eine überragende Bedeutung im tschechischen Elbeeinzugsgebiet, sondern auch deshalb, weil sie insgesamt mehr als 40% des dortigen Elbeeinzugsgebiets abdecken (vgl. Tab 2-5). Deutlich

> wird dies auch in Abbildung 6-1, in der für die untersuchten Winterhochwasser das jeweils im Einzugsgebiet oberhalb ausgewählter Talsperren in der Schneedecke gespeicherte Wasseräquivalent [in Mio. m³] dargestellt wird. Für alle Zeiträume mit bedeutender Schneerücklage im Einzugsgebiet weisen die Talsperren Orlík, Lipno und Nechranice die bei Weitem größten Werte auf, so bspw. beim Hochwasser vom April 2006.



Abbildung 6-1: In der Schneedecke gespeicherte Wasseräquivalente (in Mio. m³) für Winterereignisse oberhalb ausgewählter Talsperren (inkl. Angabe des Einzugsgebiets) (BALVÍN ET AL. 2017)

Ergänzend zur Moldaukaskade und der Talsperre Nechranice wurden in Tabelle 2-6 weitere wichtige Rückhalteräume im Elbegebiet vorgestellt. Allen ist gemeinsam, dass sie (im Vergleich zu den vorgenannten Bauwerken) nur ein verhältnismäßig kleines Einzugsgebiet abdecken. Da sie jedoch - gerade im Winterhalbjahr - bedeutsame gewöhnliche Hochwasserrückhalteräume aufweisen können (bspw. ~ 25 Mio. m³ in der Talsperre Rozkoš), ist es ebenfalls notwendig diese hinsichtlich der Hinzunahme in die Modellierung zu bewerten. Abbildung 6-2 zeigt für ausgewählte Talsperren den gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum, ausgedrückt als gespeicherte Niederschlagsmenge (in mm) im Einzugsgebiet oberhalb des Rückhalteraums. Es ist offensichtlich, dass auch von diesen Talsperren substantielle Beiträge für eine Scheitelreduktion zu erwarten sind, wenn das durch sie entwässerte Einzugsgebiet von einem großen und bedeutenden Ereignis betroffen ist.

Die Möglichkeit für den Hochwasserrückhalt einen Beitrag zu leisten, variiert deutlich zwischen Sommer- und Winterereignissen. Für alle in Tabelle 2-6 aufgelisteten Talsperren mit einem gewöhnlichen Hochwasserspeicherraum von wenigen Mio. m³ ist eine Berücksichtigung nur bei Winterereignissen sinnvoll, da dann zusätzlich die Möglichkeit einer Vorentleerung besteht. Weitere Nutzungen können diese Annahme zusätzlich beschränken, wenn wie bspw. für die Talsperre Švihov (drittgrößter Rückhalteraum in Tschechien) aufgrund ihrer wichtigen Bedeutung für die Trinkwasserversorgung der Hauptstadt Prag überwiegend von hohen Talsperrenwasserständen auszugehen ist (BALVÍN ET AL. 2017). Die Wirkung der Talsperre Rozkoš, die im Hochwasserfall sowohl im Sommer als auch im Winter einen bedeutenden gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum bereitstellen kann (Tab. 2-6), wird dadurch beschränkt, dass sie nur ein sehr kleines Einzugsgebiet von ~ 415 km² abdeckt. Untersuchungen zum Hochwasser vom Juni 2013 belegen, dass die Talsperren Labská, Les Království und Rozkoš zusammen am Pegel Brandýs nur eine vernachlässigbare Wirkung auf den Hochwasserablauf besaßen (BALVÍN ET AL. 2017).



Abbildung 6-2: Ranglistung ausgewählter tschechischer Talsperren anhand des Volumens ihres gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraums; ausgedrückt als Niederschlagsmenge [in mm] auf die durch sie entwässerte Einzugsgebietsfläche (BALVÍN ET AL. 2017)

6.2 Maßgebliche Talsperren für die Modellierung

Entsprechend der in Kapitel 6.1 vorgestellten Auswertungen bilden die Moldaukaskade (mit der Talsperre **Lipno I** an der oberen Moldau und der Talsperre **Orlík** an der Mittelmoldau) sowie der Stausee **Nechranice** an der Eger das Grundgerüst für die Modellierung der 30 ausgewählten Hochwasser im Ist-Zustand. Ihr Einfluss wird zur Bewertung des scheitelreduzierenden Effekts der Talsperren auf Pegel an der Elbe in den überwiegenden Fällen herangezogen. Nur in Einzelfällen (3 bzw. 4 Hochwasserereignisse) wurden für die Ableitung die Talsperrenwirkung auch die Talsperren **Švihov** (Sázava) und **Hracholusky** (Einzugsgebiet der

> Berounka) berücksichtigt. Diese liegen an Nebenflüssen, die unterhalb der großen Talsperren, aber oberhalb von Prag in die Moldau einmünden, und konnten bei den spezifisch betrachteten Ereignissen eine deutliche Vorentleerung und einen signifikanten Volumenrückhalt vorweisen (BALVÍN ET AL. 2017). Die Talsperren **Les Království** und **Rozkoš** (im Elbeeinzugsgebiet oberhalb der Moldaumündung) fanden bei der Analyse des Hochwassers 2013 Berücksichtigung - ihre scheitelreduzierende Wirkung betrug 20 m³/s am Pegel Brandýs n. L. und war am Pegel Ústí n. L. nicht mehr nachweisbar.

> Entsprechend der unterschiedlichen Zeitpunkte der Inbetriebnahme der zuvor genannten Rückhalteräume in Tschechien sowie der beiden großen Speicher Bleiloch und Hohenwarte der Saalekaskade ergeben sich für die Hochwasser (bzw. HQ-Werte) seit 1890 unterschiedliche Ausmaße der Effekte durch Talsperren, die bei der Homogenisierung (und somit in der Modellierung) zu berücksichtigen sind. Abbildung 6-3 stellt den zunehmenden Grad der Beeinflussung anhand der langen HQ-Reihe für den Pegel Barby an der deutschen Elbe (unterhalb der Saalemündung) nochmals grafisch dar.



Abbildung 6-3: Lange inhomogene HQ-Reihe (1890-2013) für den Pegel Barby mit Kennzeichnung der unterschiedlichen Ausbauzustände hinsichtlich Talsperren (zunehmender Grad der Beeinflussung dargestellt durch Farbwahl zw. grün und rot; Erläuterungen im Text)

Die unterschiedlichen Ausbauzustände, die in der Reihe 1890-2013 verschiedene homogene Teilzeiträume beschreiben, lassen sich mit ihren Gültigkeitszeiträumen und den jeweils relevanten Talsperren wie folgt charakterisieren (vgl. Tab. 2-5 und Tab. 2-7; in Klammer: Farbwahl in Abb. 6-3):

- 1890 1932 (dunkelgrün): "natürlicher" Zustand 1890 ohne Talsperrenwirkung
- **1933 1941 (hellgrün):** Zustand ohne Wirkung der Talsperren in Tschechien, aber mit Berücksichtigung der Talsperre Bleiloch an der Saale (vgl. hierzu MITTELSDORF 2007: Füllung der Talsperre Hohenwarte bis November 1941)
- **1942 1959** (gelb): Zustand ohne Wirkung der Talsperren in Tschechien, aber mit Berücksichtigung der gesamten Saalekaskade (Bleiloch und Hohenwarte)
- **1960 1962 (orange):** Zustand mit Wirkung der Talsperre Lipno in Tschechien und mit Berücksichtigung der gesamten Saalekaskade
- **1963 1967 (hellrot):** Zustand mit Wirkung der Talsperren Lipno und Orlík in Tschechien und mit Berücksichtigung der gesamten Saalekaskade
- **1968 2013 (dunkelrot):** Zustand mit Wirkung der Talsperren Lipno, Orlík und Nechranice in Tschechien und mit Berücksichtigung der gesamten Saalekaskade

Es ist zu beachten, dass die Festlegung für den natürlichen Zustand "1890" für die analysierten Elbepegel Aken, Lutherstadt Wittenberg, Torgau und Dresden (oberstrom der Saalemündung gelegen) bis zum Jahr 1959 reicht.

Ausgehend von der zuvor beschriebenen Einteilung des Zeitraums 1890-2013, hat sich aus Gründen der Daten- und Modellverfügbarkeit sowie im Rahmen von Erkenntnissen der Modellierung im späteren Projektverlauf die Notwendigkeit ergeben, einzelne der zuvor dargestellten Zeiträume zusammenzufassen bzw. (wiederum andere) nochmals zu unterteilen. Diese für die Modellierung und Ableitung der Transformationsfunktionen notwendigen Aspekte werden in den Kapiteln 2.4.3, 7.2.1 und 11.1 näher erläutert. Bundesanstalt für Gewässerkunde

> Bericht BfG-1938

7 Eingesetzte Modellwerkzeuge

Vergleichbar mit der im EU-INTERREG-Projekt "LABEL" (BFG 2012) gewählten Vorgehensweise, wurden auch im Projekt zur Homogenisierung der langen HQ-Reihen die Berechnungen für das tschechische und das deutsche Elbegebiet von verschiedenen Partnern durchgeführt. Für Moldau, Eger und Elbe oberhalb der Modellschnittstelle am Pegel Ustí nad Labem (ca. 40 km oberhalb der tschechisch-deutschen Grenze) zeigte sich im Auftrag der BfG das tschechische Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft (VÚV TGM) verantwortlich, das die Modellierung in Kooperation mit dem Ingenieurbüro AQUALOGIC CONSULTING bearbeitete. Beginnend ab dem Pegel Ustí nad Labem erfolgten für die deutsche Elbestrecke sowie an der Saale (unterhalb der Saalekaskade bis zur Mündung) die Berechnungen durch die BfG. Die jeweils eingesetzten tschechischen Modellsysteme werden in Kapitel 7.1 näher erläutert, die durch die BfG betriebenen Modelle sind in Kapitel 7.2 beschrieben.

7.1 Eingesetzte Modelle für den tschechischen Teil des Elbegebiets

Um für die zu analysierenden Hochwasser Berechnungen sowohl für den natürlichen (durch Talsperren unbeeinflussten) Zustand als auch für die durch Talsperren beeinflussten Zustände (Kap. 6) durchführen zu können, ist es notwendig, Modellsysteme für mindestens zwei unterschiedliche Zustände aufzubauen. Hierfür wurde auf die Werkzeuge zurückgegriffen, die bereits erfolgreich im "LABEL"-Projekt (s. o.) Anwendung fanden. Für die Nutzung im vorliegenden Vorhaben mussten Anpassungen und Modifikationen vorgenommen werden, die im Wesentlichen in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

7.1.1 Modellsystem für den durch Talsperren unbeeinflussten Zustand "1890"

Gewässersysteme in Tschechien und Deutschland wurden in der Vergangenheit durch zahlreiche anthropogene Eingriffe verändert. Hierzu zählen nicht nur der Bau von Talsperren, sondern auch Laufverkürzung, Ausbaumaßnahmen (Wehre, Buhnenbau, Deiche, etc.) oder Landnutzungsänderungen, die zu veränderten Abflussbedingungen führen können (IKSE 2005). Während viele dieser Eingriffe vorwiegend lokale Auswirkungen besitzen (und somit nicht im Fokus dieses Projekts stehen), haben Talsperren (aufgrund des Projektziels) und Gewässerlaufveränderungen (aufgrund des Einflusses auf die Wellenlaufzeiten) für die im Folgenden beschriebene Modellierung eine übergeordnete und überregionale Bedeutung. Letztere können maßgeblich beeinflussen, ob sich Wellenscheitel aus Haupt- und Nebengewässer überlagern und so zu einer Verschärfung der Hochwassersituation im Unterlauf beitragen. Auf die Auswirkungen von Eindeichungen und den dadurch bedingten Verlust von natürlichen Überschwemmungsgebieten geht Kapitel 9 gesondert ein.

> Um historische Gewässermodelle aufbauen zu können, muss eine adäquate Datengrundlage zur Verfügung stehen. Diese beinhaltet sowohl die geometrischen Daten des abzubildenden Gewässerzustands (Querprofile) als auch hydrologische Messdaten über Wasserstand und Abfluss zur Kalibrierung bzw. Validierung des Modellsystems. Diese Anforderungen schränken vielfach die Möglichkeiten zur Erstellung eines Modells für historische, weit zurückliegende Gewässerzustände deutlich ein.

> Das Modelllayout für den historischen Gewässerzustand "1890" (vgl. Kap. 6.2) im tschechischen Elbegebiet wird in Abbildung 7-1 vorgestellt. Es setzt sich zusammen aus verschiedenen, überwiegend hydrodynamisch-numerischen 1D-Modellen, implementiert in den Softwarepaketen HEC-RAS (USACE 2016) und AquaLog (siehe v.a. Kap. 7.1.2).



Abbildung 7-1: Layout des hydrodynamisch-numerischen 1D-Modellsystems für den historischen Zustand von Moldau, Eger und Elbe im tschechischen Bearbeitungsgebiet; Angaben der Flusskilometer jeweils als Entfernung zur Mündung bzw. zur tschechisch-deutschen Grenze (BALVÍN ET AL. 2017)

Da die Moldaukaskade (hinsichtlich Abfluss und scheitelreduzierender Wirkungen) den Wellenablauf in der Elbe dominiert, wurde bei der Modellerstellung besonderer Wert darauf gelegt, dort die historische, durch Talsperren unbeeinflusste Situation bestmöglich zu rekonstruieren. Für die etwa 180 km lange Modellstrecke zwischen České Budějovice (Budweis) und Prag-Chuchle wurden deshalb aus verschiedenen Projekten (STUDY OF VLTAVA WATERWAY 1911, KREJČÍ ET AL. 2003, BFG 2012) geometrische Daten für den Zeitraum 1902 bis 1911 gewonnen. Mit ihrer Hilfe war es im Modell möglich, verlässliche Aussagen zu den Wellenlaufzeiten in der Moldau zu treffen. Für die Nebenflüsse Otava und Lužnice konnten ebenfalls Daten vom Beginn des 20. Jahrhunderts verwendet werden (BALVÍN ET AL. 2017). Der unterhalb Prag-Chuchle verlaufende Moldauabschnitt und die betrachtete Elbestrecke zwischen Brandýs n. L. und Ustí n. L. wurden aufgrund fehlender historischer Daten und der deutlich geringeren anthropogenen Veränderung (im Vergleich zum Bereich der Moldaukaskade) mit der aktuellen Modellgeometrie (vgl. Kap. 7.1.2) hydrodynamisch-numerisch modelliert. An der Eger wurde das hydraulische Modell im Rahmen des "LABEL"-Projekts von der Mündung bei Leitmeritz flussaufwärts bis zur Talsperre Nechranice (Pegel Stranná) erweitert - diese Erweiterung wird nun erneut genutzt. Lediglich der obere Moldauabschnitt zwischen Vyšši Brod und České Budějovice sowie die Zuflüsse der Sázava und Berounka können derzeit nicht hydraulisch modelliert werden, sondern müssen mit Hilfe des Aqualog-Systems (vgl. Kap. 7.1.2) in die Berechnungen integriert werden (vgl. Abb. 7-1).

Zur Kalibrierung bzw. Validierung des historischen Modellsystems wurden Daten zahlreicher Hochwasser der 1890er-Jahre (09/1890, 10/1894, 05/1896, 08/1897, 09/1899) sowie der Ereignisse vom September 1888, Oktober 1915, Januar 1920 und März 1940 gesammelt, aufbereitet und ausgewertet. Da außer für das Hochwasser 1890 keine annähernd vollständigen Datensätze aufgebaut werden konnten, die alle zur Modellierung notwendigen hydrologischen Randbedingungen umfassen, wurden mit Hilfe dieser Ereignisse nur Teilabschnitte der Modelle validiert. Für das Hochwasser 1890 zeigt Abbildung 7-2 den Vergleich zwischen der gemessenen (Modřany) und modellierten Ganglinie (Chuchle), in BALVÍN ET AL. 2017) werden weitere Ergebnisse für Standorte der heutigen Talsperre Kamýk präsentiert.



Abbildung 7-2: Vergleich von gemessener und modellierter Ganglinie in Modřany/Chuchle für das Hochwasser vom September 1890 (BALVÍN ET AL. 2017)

7.1.2 Modellsystem für die durch Talsperren beeinflussten Zustände

In Abbildung 7-3 wird das Modelllayout für den aktuellen, durch Talsperren beeinflussten Gewässerzustand schematisch dargestellt. Es unterscheidet sich vom historischen Modell für den Zustand "1890" im Wesentlichen auf der Strecke der Moldau, wo das existierende AquaLog-Modell (AQUALOGIC CONSULTING 2011) vollständig Verwendung findet.



Abbildung 7-3: Layout des AquaLog-Modellsystems für den aktuellen Zustand von Moldau, Eger und Elbe im tschechischen Bearbeitungsgebiet; Angaben der Flusskilometer jeweils als Entfernung zur Mündung bzw. bis zur tschechisch-deutschen Grenze (BALVÍN ET AL. 2017)

AquaLog ist ein für mehrere Zwecke einsetzbares Modellierungssystem, das gegenwärtig vom ČHMÚ für die Abfluss- und Wasserstandsvorhersage im tschechischen Teil des Elbegebiets benutzt wird. Die Software besteht aus mehreren Modulen zur integralen Modellierung von komplexen hydrologischen und Wasserbewirtschaftungssystemen. Unterschiedliche Modellansätze werden dabei zur Abbildung der Einzugsgebietshydrologie, von Flusssystemen, von Seen und Talsperren verwendet und automatisch unter einer Oberfläche zu einem Modell für das darzustellende Gesamtsystem zusammengefasst. In einem Drei-Schritt-Dekompositionsverfahren (engl.: three-step-decomposition method) können die Berechnungen in der Makro-, Meso- und Mikroskala aufgelöst werden.

Der Anwender kann - abhängig von den zur Verfügung stehenden Zeitreihen und den Rahmenbedingungen des Echtzeitbetriebs - ein beliebiges und automatisch erzeugtes Laufzeit-

modell mit variabler Modellkonfiguration aufbauen. AquaLog stellt somit eine kompakte Umgebung für alle relevanten Phasen der Datenprozessierung dar. Der AquaLog-Kern umfasst vier Modellierungstechniken, die sowohl auf Grundlage eines "lumped model"-Ansatzes (d. h. alle Parameter und Variablen beschreiben durchschnittliche Werte über den gesamten Bezugsraum) oder eines "distributed model"-Ansatzes (d. h. alle Parameter und Variablen variieren räumlich) umgesetzt werden können: (i) Modellierung von Schneeakkumulation und Schneeschmelze, (ii) Niederschlag-Abfluss-Modellierung, (iii) hydrologische und hydrodynamische Wellenablaufsimulation, (iv) Speicherraumbewirtschaftung (sMan).

Das Modul **sMan** beschreibt ein interaktives Speicherbecken-Modell, das nicht-stationäre räumliche Strukturen von unabhängigen Bestandteilen eines Wasserbewirtschaftungssystems auf der Basis von *Petri-net*-Algorithmen abbildet. Es ermöglicht die Zerlegung eines Speicherbeckenbewirtschaftungssystems in die Komponenten "Abflusssteuerung" und "Berechnung der Wasserbilanz" im Rahmen von synchronisierten Berechnungen. Weiterhin erlaubt das Modul **sMan** Berechnungen des gesamten Talsperrensystems im interaktiven Modus für jeden Berechnungsschritt. Es umfasst folgende Untermodelle: (i) **RES** – Speicherbeckenbilanzmodell, gewöhnlich abgebildet als Differenzial mit den vier Zustandsgrößen Beckenwasserstand, Zufluss, Abgabe und Beckeninhaltslinie, (ii) **MS3** – Überlauf, (iii) **MB3** – Grundablass, (iv) **ELN** – Wasserkraftwerk, (v) **DMY** – Hilfsmodul für die Wellenretention, (vi) **QVH** – Abflusskurve für das Unterwasser und (vii) TDR- oder Muskingum-Cunge-Modell.

Das Hauptmodul **RES** kann mit Hilfe eines "no-wedge-storage"-Differenzials (Muskingum X = 0) beschrieben werden. Es berücksichtigt vier Zustandsgrößen: Beckenwasserstand H1, Zufluss I, Abgabe O und die Volumenkurve im Fall von alternativen Berechnungsstrukturen mit dem Modul RES. Abhängig von der Datenverfügbarkeit wird die Berechnungsvariante automatisch gewählt, um die fehlenden Daten zu ermitteln. Die Verbindung zwischen sMan und HEC-RAS erfolgt über eine DSS-formatierte Datenbank, die im Datenbankunterstützungssystem HEC-DSSvue implementiert ist. Für die Speicherbeckenbewirtschaftung ist eine Zwei-Schichten-Schematisierung möglich. Eine Vereinfachung besteht in der Ermittlung einer Gesamtabgabe aus der Talsperre, die sich aus der Summe aller Abgaben zusammensetzt und die dann abschließend nur auf die maximal mögliche Abgabe überprüft wird. In einer umfassenden Schematisierung werden alle Abgaben einzeln auf der Grundlage der Bauwerksdaten und deren Beaufschlagung betrachtet (AQUALOGIC CONSULTING 2011).

Wie Abbildung 7-3 zeigt, integriert das verwendete Modellsystem in seiner Grundstruktur nur die Talsperren der Moldaukaskade sowie die Talsperre Nechranice in die Berechnungen. Besteht der Bedarf (aufgrund ihrer scheitelreduzierenden Wirkung bei einzelnen Ereignissen, Kap. 6.2) weitere Talsperren in die Betrachtung mit einzubeziehen, dann kann deren Wirkung mittels eines im AquaLog-System implementierten Muskingum-Cunge-Verfahrens bis zu den Rändern des bestehenden Modellsystems transformiert werden (BALVÍN ET AL. 2017).

> Die im System enthaltenen hydraulischen Modelle für Elbe, Eger und Moldau decken mit ihren Querprofilen das Überschwemmungsgebiet ab, welches vom Hochwasser 2002 betroffen war (BFG 2012). Die verwendeten Modelle dienen hauptsächlich der Modellierung des Hochwasserwellenablaufs im frei fließenden Zustand, wenn die Schifffahrt eingestellt ist und die Wehre heruntergefahren sind. Sie basieren auf dem digitalen Geländemodell, das nach dem Hochwasser 2002 erstellt wurde, sowie auf gemessenen Flussquerprofilen. Die Abstände zwischen den Modellquerprofilen schwanken zwischen 50 und 350 m. An das Hauptgerinne angrenzende Vorländer, die als natürliche Überschwemmungsflächen wirken, werden in den Querprofilen abgebildet. Im Vergleich zum in BFG (2012) beschriebenen Modell wurden signifikante Modellverbesserungen vor allem im Mündungsbereich der Berounka in die Moldau erreicht. Dort wurde das oberstrom ursprünglich nur bis Chuchle reichende Modell um den Gewässerabschnitt bis zur untersten Talsperre Vrané erweitert, um die im Mündungsbereich auftretenden Ausuferungen sowie das zeitliche Zusammentreffen von Hochwasserwellen aus Moldau und Berounka besser modellieren zu können (BALVÍN ET AL. 2017).

> Das verwendete gekoppelte Modellsystem wurde für die Hochwasser 2002, 2006 und 2013 kalibriert bzw. validiert. Die bereits in BFG (2012) nachgewiesene Modellgüte wurde bestätigt und ist hinsichtlich der modellierten Scheitelabflüsse (im Vergleich zu den Messwerten) in Anlage 2.2 dokumentiert. Dort sind, nicht nur für die drei genannten Hochwasser, sondern für alle 30 im Projekt untersuchten Ereignisse die Berechnungsergebnisse an den Pegel Prag-Chuchle, Mělník, Děčín und Ustí n. L. beschrieben.

7.1.3 Wirkung von Talsperren und Ermittlung von Modellrandbedingungen

Das in Kapitel 7.1.2 vorgestellte Modell der Moldau für den durch Talsperren beeinflussten Zustand wird im Wesentlichen für drei verschiedene Anwendungszwecke eingesetzt:

Berechnung und Elimination der Wirkung einzelner Talsperren

Für jede Talsperre existieren bewährte Handlungsanweisungen, die u. a. Angaben zu den Durchflüssen der Auslassbauwerke, den Kapazitäten der Kraftwerksturbinen und Wasserstand-Volumen-Beziehungen für die Speicherräume beinhalten. Der Zufluss zu den Talsperren kann in der Regel über einen Bilanzansatz unter Berücksichtigung des gemessenen Ausfluss aus dem Rückhalteraum und der Veränderung der Wasserspiegellage in der Talsperre errechnet werden (vgl. hierzu auch Kapitel 7.2.1). Die berechneten Zuflüsse zu den Talsperren Lipno und Nechranice, die gleichzeitig Modellrandbedingungen an Moldau/Eger sind, werden (anstatt der gemessenen Ausflüsse) herangezogen, wenn im historischen Modell "natürliche" Modellrandbedingungen an den Pegeln Vyšši Brod (Moldau) und Stranná (Eger) benötigt werden.

Ableitung der seitlichen Zuflüsse zu Talsperren / von weiteren Randbedingungen

Auf Grundlage der berechneten Zuflüsse zu den weiteren Talsperren in der Moldaukaskade kann unter Hinzunahme von gemessenen Zuflüssen aus Nebengewässern, berechneten Zuflüssen von in Nebengewässern gelegenen Talsperren (Švihov, Hracholusky, vgl. Kap. 6) und Beiträgen aus Zwischeneinzugsgebieten (ebenfalls berechnet über Massenbilanzen oder - bei guter Datenlage - mit Hilfe von N-A-Modellen) der notwendige hydrologische Input-Datensatz aufgebaut werden, um alle Randbedingungen für die hydrodynamisch-numerische Modellierung des durch Talsperren unbeeinflussten Zustands bereitstellen zu können.

Untersuchung des Hochwasserablaufs im Zustand "2013" (vgl. Kap. 10.2)

Im Rahmen der Modellierung war zu überprüfen, in wie weit sich der tatsächliche Ablauf der 30 analysierten Hochwasser verändern würde, wenn die Ereignisse ab 1970 unter den Betriebsbedingungen des Jahres 2013 stattgefunden hätten. Aufgrund der Anpassung von Steuerungsvorschriften (BALVÍN ET AL. 2017), baulicher Veränderungen (bspw. der Auslassbauwerke), der Verbesserung des unterstrom vorhandenen Hochwasserschutzniveaus und Anpassungen im zur Verfügung stehenden Hochwasserrückhalteraum (z. B. aufgrund der Veränderung von Stauzielen) war davon auszugehen, dass eine gewisse Anzahl der Ereignisse "heute" (also 2013) mit anderen Scheitelabflüssen ablaufen würde. Zur Identifikation der Ereignisse und deren weitergehender Analyse wurde ebenfalls das in Kapitel 7.1.2 beschriebene Modell verwendet.

7.2 Eingesetzte Modelle für den deutschen Teil des Elbegebiets

Für die Modellierung der 30 ausgewählten Hochwasser auf der deutschen Binnenelbe wird für alle abzubildenden Zustände mit und ohne Talsperren das Modellsystem für den heutigen Gewässerzustand verwendet. Der Verzicht auf den Aufbau eines Modells für den historischen Zustand der Elbe bringt zum Ausdruck, ...

- ... dass zur Erstellung eines historischen Elbemodells in Deutschland (vergleichbar mit dem zuvor beschriebenen Modell für die Moldau), im Rahmen des Projekts keine ausreichende Datengrundlage zur Verfügung stand (vgl. Kap. 8).
- ... dass nach derzeitigem Kenntnisstand, die gewässermorphologische Entwicklung seit 1890 zwar die lokalen Durchflussverhältnisse an den Pegeln verändert hat, der großräumige Wellenablauf (Laufzeiten) hiervon jedoch weitestgehend nicht betroffen war, da die wesentlichen Laufveränderungen (Durchstiche/Laufverkürzungen) bereits im Zeitraum zwischen 1600 und 1810 sowie im Rahmen der Mittelwasserregulierung ab 1844 (IKSE 2005, ROMMEL 2012) und somit vor 1890 stattgefunden haben.
- ... dass eine Berechnung des Einflusses von seit 1890 verlorenen Überschwemmungsgebieten der Elbe und ihrer Nebenflüsse (vgl. Kap. 1 und 9) nicht in dem erforderlichen Umfang bzw. der Detailliertheit möglich ist, um diesen Effekt in der Homogenisierung in gleichem Maße wie bezüglich des Einflusses der Talsperren

quantitativ berücksichtigen zu können. Der Aufbau eines Elbemodells "1890" sollte deshalb zukünftig angestrebt werden (Kapitel 13).

Aufbauend auf den Modellierungen in Tschechien geht die Wirkung der dortigen Talsperren als obere Randbedingung in die Simulationen auf der deutschen Elbestrecke am Pegel Ustí nad Labem (SOBEK-Modell) ein. Die Wirkung der Saaletalsperren wird mittels eines volumenbasierten Bilanzansatzes für den Pegel Kaulsdorf berechnet, der die Eingangsrandbedingung des WTM-Modells der Saale bildet. Am Pegel Halle-Trotha erfolgt die Kopplung des WTM-Modells und des SOBEK-Modells, welches die Abflussverhältnisse in der Saale bis zur Mündung in die Elbe abbildet. Die verwendeten Ansätze und Modelle werden in den folgenden Kapiteln näher vorgestellt.

7.2.1 Berechnung der Wirkung der Saalekaskade am Pegel Kaulsdorf

Die im Vorhaben verwendete volumenbasierte Bilanzierungsmethode zur Ermittlung der Wirkung der Saalekaskade am Pegel Kaulsdorf, der sich direkt unterhalb der letzten Talsperre (Ausgleichsbecken Eichicht) befindet, ist vergleichbar mit der Vorgehensweise, die auch für die Analysen der Hochwasser 2002, 2006 und 2011 (vgl. BFG 2012) sowie 2013 (vgl. TLUG 2015 bzw. Abb. 2-23) herangezogen wurde. Die hierfür grundlegenden Daten werden in Kapitel 8.2.4 beschrieben und besitzen im Wesentlichen eine tägliche Auflösung. Vereinzelt lagen auch stundenwertbasierte Daten vor, die vor allem zur Plausibilisierung der mittels Tageswerten durchgeführten Analysen dienten.

Basierend auf Inhaltsganglinien [Volumen in Mio. m³] für die großen Talsperren Bleiloch und Hohenwarte sowie für die kleineren Rückhalteräume bzw. Ausgleichsbecken Burgkhammer, Eichicht, Walsburg und Wisenta kann tageswertbasiert das gesamte in der Saalekaskade gespeicherte Volumen summarisch berechnet werden. Über die Volumenänderung zwischen zwei Tagen lässt sich das zurückgehaltene (Δ = positiv) bzw. freigegebene Volumen (Δ = negativ) errechnen. Dieses kann gemittelt über den Tagesverlauf als Abflussänderung pro Zeitschritt in [m³/s] ausgedrückt werden. Durch Addition bzw. Subtraktion dieses Wertes zum gemessenen (durch Talsperren beeinflussten) Abfluss am Pegel Kaulsdorf, wird anschließend der unbeeinflusste, natürliche Abfluss berechnet. Die Integration einer Laufzeitkomponente für die Strecke von Blankenstein bis Kaulsdorf erfolgte aufgrund der allgemeinen Einzugsgebietscharakteristik, wegen der Verwendung zugrundeliegender Daten in Tageswertauflösung und nach Auswertungen vorangegangener Projekte an der Saale nicht (OFM 1981, LÜTZELBERGER 2002).

Abbildung 7-4 illustriert dieses Vorgehen nochmals anhand des Hochwassers vom April 1994. Dabei stellt die grüne Linie das täglich gemessene, summarische Talsperrenvolumen [Mio. m³] der Saalekaskade dar. Steigt das Volumen an, dann wird Wasser zurückgehalten und der Abfluss wäre natürlicherweise höher als der tatsächlich gemessene. Die schwarze Abflussganglinie (berechnet) verläuft oberhalb der hellblauen Linie (gemessen). Zeigt der Talsperreninhalt fallende Tendenz, dann verhalten sich beeinflusster und unbeeinflusster Abfluss umgekehrt zueinander. Insgesamt ist im vorgestellten Beispiel eine Scheitelreduktion durch die Saale-Talsperren um mehr als 100 m³/s und eine deutliche Verschiebung des Scheiteleintrittszeitpunkts (später) zu beobachten.



Abbildung 7-4: Berechnung der von Talsperren unbeeinflussten Ganglinie am Pegel Kaulsdorf/Saale; erläutert anhand des Hochwassers vom April 1994 [grüne Linie: Talsperreninhalt (gemessen); blaue Linie: Abfluss am Pegel Kaulsdorf (gemessen); rote Linie: berechnete unbeeinflusste Ganglinie in Kaulsdorf (Primärergebnis); schwarze Linie: berechnete unbeeinflusste Ganglinie in Kaulsdorf (plausibilisiert; schwarze gestrichelte Linie: Abfluss am Pegel Blankenstein-Rosenthal (gemessen)]

Anhand der in Abbildung 7-4 dargestellten Ganglinien kann erläutert werden, welche weiteren Schritte zur Verbesserung und Plausibilisierung der ermittelten Ergebnisse vorgenommen wurden:

- Mit Hilfe der gemessenen Ganglinie des Pegels Blankenstein-Rosenthal (schwarze, gestrichelte Linie), die den natürlichen Hochwasserablauf oberhalb der Saalekaskade beschreibt, lässt sich abschätzen, ob die berechnete natürliche Ganglinie in Kaulsdorf hinsichtlich ihrer Form realistisch ist. Wie in Abbildung 7-4 dargestellt, sollten beide Ganglinien eine vergleichbare Wellenform aufzeigen.
- Die rote Ganglinie zeigt den primären Output der volumenbasierten Berechnung sie ist Grundlage für die Ableitung der finalen "natürlichen" Ganglinie (schwarz). Starke Schwankungen der primären Berechnungsergebnisse im niedrigen Abflussbereich,

> die kein natürliches Verhalten aufzeigen, sondern auf die Talsperrensteuerung zur Elektrizitätsgewinnung zurückzuführen sind, lassen sich mittels eines gleitenden Mittelwerts (über 5 Tage) für Abflüsse < 2*MQ glätten und somit weitestgehend eliminieren. Verfahrensbedingte, negative natürliche Abflüsse (vgl. den Zeitraum im Mai 1994) lassen sich somit ebenfalls vermeiden.

Soweit stundenwertbasierte Daten vorlagen (bspw. für den berechneten Ausfluss aus der Talsperre Eichicht oder für die Inhaltsganglinien der einzelnen Becken beim Hochwasser im April 2006 und Juni 2013), wurden diese vergleichend analysiert, um mögliche Unsicherheiten und Abweichungen der auf Tageswerten basierenden Ergebnisse für alle 30 Hochwasser einschätzen zu können.

Die auf Basis von Tageswerten berechneten Ganglinien für den "natürlichen" Zustand ohne Saalekaskade wurden abschließend mit Hilfe des in Kapitel 8.2.3 beschriebenen Verfahrens in Datensätze mit stündlicher Auflösung umgerechnet und bildeten somit die Grundlage für die Modellierung des Wellenablaufs an der Saale zwischen Kaulsdorf und Halle-Trotha durch Einsatz des im folgenden Kapitel vorgestellten WTM-Modells. Die für alle 30 Hochwasser berechneten Scheitelabflüsse und -reduktionen am Pegel Kaulsdorf sind in Anlage 2.1 dargestellt.

7.2.2 WTM-Modell der Saale zwischen Kaulsdorf und Halle

Der Streckenabschnitt der Saale zwischen dem unmittelbar unterhalb des Saalekaskade gelegenen Pegel Kaulsdorf bis zum Pegel Halle-Trotha wird mithilfe des BfG-eigenen Wellentransformationsmodells WTM abgebildet (BFG 2013A). WTM verknüpft gegebene Abflüsse aus Teileinzugsgebieten (generiert mittels vorgeschalteter N-A-Modelle oder auf Basis von Ganglinien an Pegeln) entsprechend der Gewässerstruktur und transportiert diese über festgelegte Knoten. Wellenlaufzeit und -transformation werden dabei ähnlich dem Einheitsganglinienverfahren entsprechend der vorher festgelegten Translationszeiten und Faltungsparameter simuliert (BFG 2013A). Ein WTM-Knoten kann eine beliebige Anzahl an Eingängen aufweisen, so z. B. das modellinterne Ergebnis (Ganglinie) des oberstrom gelegenen WTM-Knotens als auch extern eingespeiste Daten wie z. B. gemessene Ganglinien der Nebenflüsse. Zudem erlaubt WTM die Aufteilung von Abflussganglinien in mehrere Teilabflüsse mit jeweils gesonderter Parametrisierung sowie die Implementierung von Speichern mit Füll- und Auslauffunktionen; beides dient zur Abbildung des jeweiligen Abflussverhaltens und von Retentionseffekten zwischen zwei WTM-Knoten. Die anzusetzenden Faltungsparameter richten sich in Form und Länge nach der zwischen zwei Knoten beobachteten Wellentransformation bzw. Impulsantwort. Für unterschiedliche Abflussbereiche können auch unterschiedliche Faltungsparameter angegeben werden. Im Allgemeinen sind jedoch nur wenige Faltungstypen (Faltungsform und -länge) notwendig, um die Wellentransformation eines Gewässers beschreiben zu können (z. B. schnelle, mittlere oder lange Faltung für Gebirgs-, Mittelgebirgs- bzw. Flachlandgewässer, vgl. Abb. 7-5).



Abbildung 7-5: Schematische Darstellung des WTM-Modells zwischen Kaulsdorf und Rudolstadt; dargestellt sind die WTM-Knoten (Pegel), ihre Zuflüsse sowie die unterschiedlichen Faltungstypen für Wellenablauf- und Retentionseffekte

Das WTM-Modell der Saale wurde eigens für die Berechnungen im Rahmen dieses Projekts für den knapp 192 km langen Saaleabschnitt zwischen Kaulsdorf und Halle aufgebaut (Abb. 7-6). In den bisherigen Untersuchungen in BFG (2012) und BFG (2013) zu den Hochwassern 2002, 2006, 2011 und 2013 wurde die Wirkung der Saalekaskade lediglich "händisch", d. h. mittels eines grafischen Verfahrens (in Excel) unter Abschätzung der Wellenlaufzeiten, bis zur oberen Randbedingung des SOBEK-Modells in Halle-Trotha transportiert. Somit stellt die Erweiterung des Modellsystems um die genannte Gewässerstrecke eine substanzielle Verbesserung dar, die für die Analysen im Rahmen des Vorhabens zur Homogenisierung erreicht werden konnte.

Abbildung 7-6 präsentiert das Modelllayout des verwendeten Saalemodells. Es berücksichtigt die Ganglinien der wichtigsten Zuflüsse Loquitz, Schwarza, Orla, Roda, Ilm, Unstrut, Wethau und Weiße Elster an ihren jeweils mündungsnächsten Pegeln. An der Schwarza kann der Pegel Blankenburg-Waidmansheil nur für Berechnungen bis zum Jahr 1986 verwendet werden; danach finden die Messreihen des weiter oberstrom gelegenen Pegels Schwarzburg Eingang ins Modell. Der Pegel Halle-Trotha UP stellt die untere Modellgrenze des WTM-Modells dar, an dem die Modellergebnisse zur weiteren Berechnung in das hydrodynamische SOBEK-Modell der Saale und nachfolgend der Elbe (siehe Kap. 7.2.3) übergeben werden.



Abbildung 7-6: Layout des WTM-Modells der Saale von Kaulsdorf bis Halle-Trotha einschließlich der im Modell berücksichtigten Nebenflüsse

Die Parametrisierung des WTM-Modells, d. h. die Bestimmung der Translations- und Retentionsgrößen sowie der Abflussbeiträge der Zwischeneinzugsgebiete, erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird das Modell durch die isolierte Betrachtung der einzelnen Streckenabschnitte zwischen den Pegeln mit dem Ziel parametrisiert, möglichst viele der 30 abgelaufenen Hochwasserereignisse durch einen einheitlichen Parametersatz adäquat abzubilden. Im Zentrum der Betrachtung stehen dabei verstärkt jene (größeren) Ereignisse, die sich unmittelbar auf den Hochwasserverlauf der Elbe auswirkten; kleineren Ereignissen, die an der Saale teilweise weit unterhalb von MHQ bzw. MQ lagen, wird hierbei eine geringere Bedeutung beigemessen. Insgesamt traten sieben solcher "Kleinstereignisse" auf, die in Tabelle 7-1 mit ihren Abflüssen an den Pegel Kaulsdorf und Halle-Trotha aufgelistet sind.

Pegel [m ³ /s]	1977-08	1981-10	1993-03	1997-07	2002-08	2006-08	2009-06	MQ	MHQ
Kaulsdorf	38,4	56,6	33,1	32,0	7,8	26,6	15,6	16,8	84,9
Halle-Trotha	196	201	162	152	206	90,9	62,7	97,9	369

 Tabelle 7-1:
 Scheitelabflüsse der "Kleinstereignisse" der Saale an den Pegeln Kaulsdorf und Halle-Trotha unter Angabe des MQ und MHQ (Bezugszeitraum: 1955-2013, MQ/MHQ nach TLUG 2015A)

Die Festlegung der Translationszeiten (Faltungslänge) zwischen den WTM-Knoten (d. h. Saale- und Zuflusspegel) wurde aufgrund der jeweiligen Fließstrecke und auf Basis der Messganglinien abgeschätzt und anschließend von Pegel zu Pegel entsprechend nachjustiert. Bei der Bestimmung der Translationszeiten zwischen den Saalepegeln wurden dabei zusätzlich die Erkenntnisse früherer Untersuchungen der Wellenlaufzeit zwischen Kaulsdorf und Camburg-Stöben (OFM 1981, LÜTZELBERGER 2002) eingebracht.

Der Abfluss der Zwischeneinzugsgebiete, der nicht durch die Messwerte der Saale- und Zuflusspegel abgedeckt ist, wird rechnerisch ermittelt und einheitlich den Zuflussganglinien zugeschlagen. In fast allen Fällen wird der Abfluss dabei stark überschätzt, so dass der Faktor manuell korrigiert werden muss. Besonders stark fällt die Korrektur der Nebenflussfaktoren bspw. für Orla und Roda aus, die aufgrund ihrer vergleichsweise kleinen EZG-Flächen das jeweilige Zwischeneinzugsgebiet nur unzureichend repräsentieren können. In Folge dessen kommt es auch dazu, dass das Zwischeneinzugsgebiet von Rudolstadt bis Rothenstein dem Saalepegel Rudolstadt zugeschlagen werden muss (Faktor 1,1), um die in Rothenstein gemessenen Wellenvolumina annähernd zu erreichen. Für alle Hochwasserereignisse wird Retention angenommen, indem für mindestens einen festgelegten Abflussbereich ein Abflussanteil definiert wird, der zurückgehalten wird; für die Knoten Rudolstadt und den Zufluss der Weißen Elster werden gar zwei zusätzliche Abflussbereiche festgelegt. Dabei werden die Abflussbereiche, in denen es zu Retentionseffekten kommt, mit einer langen Faltung sowie einer Retentionslänge von 20 Stunden (im Falle von Rudolstadt und Weißer Elster zusätzlich von 80 bzw. 60 Stunden) versehen.

Nach Aufbau dieses "Basismodells", das einen Parametersatz hervorgebracht hat, der auf der Gesamtheit aller Hochwasserereignisse basiert, erfolgte im zweiten Schritt eine detailliertere Einzelbetrachtung der Hochwasser. Dabei werden Anpassungen einzelner Parameter vorgenommen, um ggf. den Besonderheiten ereignisspezifischer Wellenabläufe Rechnung zu tragen. Eine Übersicht aller im WTM-Modell verwendeten Parameter einschließlich der Abweichungen vom Basismodell ist in Anlage 1 dargestellt. Abbildung 10-1 (in Kap. 10) zeigt exemplarisch die Mess- und Modellganglinien für das Ereignis vom Juni 2013 auf der Modellstrecke zwischen den Pegeln Kaulsdorf und Saalfeld-Remschütz.

7.2.3 SOBEK-Modell der Elbe und wichtiger Nebenflüsse

Für großräumige hydrodynamische Simulationsberechnungen setzt die BfG, neben dem 2D-Modell der unteren Mittelelbe zwischen Wittenberge und Geesthacht (BFG 2015), seit Ende 2009 ein numerisches, gekoppeltes 1D-Fließgewässermodell der gesamten deutschen Elbe und wichtiger Nebenflüsse (Schwarze Elster, Mulde, Saale, Havel) auf Basis der Software SOBEK ein BJÖRNSEN BERATENDE INGENIEURE 2009). Es ist Grundlage für hydraulische Berechnungen sowohl auf einer großen Betrachtungsskala als auch für ein breites Abflussspektrum zwischen Niedrigwasser- und extremen Hochwasserzuständen. Mit diesem Modell können durch entsprechende Anpassungen instationäre Effekte von Retentionsmaßnahmen (steuerbar / nicht steuerbar) und Rückstaueinflüsse der zuvor genannten Nebengewässer auf den Wellenablauf abgebildet werden. Das Modell kann diagnostisch (gewässerkundliche Ist-Beschreibung) als auch prognostisch (Szenarienberechnungen) eingesetzt werden. In der Vergangenheit erfolgte dies bspw. im Rahmen des LABEL-Projekts zum Nachweis der Wirkung der Havelpolder (BFG 2011) und zur Ermittlung der Wirkung der tschechischen Talsperren auf Hochwasser an der Elbe (BFG 2012, BFG 2013). Es wurde in verbesserter Form ebenfalls für die Szenarienberechnungen im Rahmen der ad hoc-Untersuchungen zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm (NHWSP, BFG 2017) angewendet.

Derzeit erfolgen vielfältige Aktualisierungen (abschnittsweise Erneuerung der Geodatengrundlage, Modellerweiterung an Saale, Mulde und Schwarzer Elster) und Verbesserungen (Nachkalibrierung) des Modells für das FuE-Vorhaben zum NHWSP (im Auftrag des UBA) sowie zur Aktualisierung des Hochwasservorhersagemodells der Elbe (im Auftrag der FGG Elbe). Aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Projektabläufe konnte auf diese Modellverbesserungen im vorliegenden Vorhaben nicht mehr zurückgegriffen werden.

Für die Modellierung im Rahmen dieser Studie wurde das gesamte vorliegende SOBEK-Modell zwischen Ústí nad Labem (Tschechien, "deutscher" Elbe-km -37,4) und Geesthacht vor den Toren Hamburgs (Deutschland, Elbe-km 585,9) verwendet. Das Layout des Modells ist in Abbildung 7-7 dargestellt. Die obere Modellgrenze des deutschen Elbe-Modells befindet sich bei Elbe-km -37,4. Da die Ergebnisse des tschechischen Modells am Pegel Ústí nad Labem (Elbe-km -39,3) übergeben werden, existiert eine Lücke von 1,9 km zwischen den beiden Modellen. Innerhalb dieser Fehlstrecke mündet der Nebenfluss Bílina in die Elbe. Sowohl Annahmen zur Fließzeit als auch Fließgeschwindigkeit mussten für diese Strecke und den einmündenden Nebenfluss getroffen und berücksichtigt werden, um die Input-Ganglinie auf die obere Randbedingung des deutschen Modells - basierend auf der Output-Ganglinie des tschechischen Modells am Pegel Ústí n. L. - übertragen zu können.



Abbildung 7-7: Layout des SOBEK-Modells der Elbe von Ustí nad Labem bis Geesthacht einschließlich der im Modell berücksichtigten Nebenflüsse

> Entlang der Modellstrecke zwischen Ústí n. L. und Geesthacht werden die Abflüsse von 18 Nebenflüssen implementiert. Während die Nebenflüsse Schwarze Elster (Mündung bei Elbekm 198,6), Mulde (Mündung bei Elbe-km 259,6), Saale (Mündung bei Elbe-km 290,8) und Havel (Mündung bei Elbe-km 438,0) auf Teilstrecken als eigene Modellabschnitte vollwertig hydrodynamisch-numerisch modelliert werden (dunkelblaue Pfeile in Abb. 7-7), finden ein weiterer tschechischer Nebenfluss (Ploučnice, "deutscher" Elbe-km -14,1) und dreizehn deutsche Nebenflüsse zwischen den Pegeln Ústí nad Labem und Torgau (Elbe-km 154,2) als punktuelle, laterale Zuflüsse (hellblaue Pfeile in Abb. 7-7) Berücksichtigung. Die Grundlage für die Modellgeometrie und den morphologischen Zustand des Gewässers stellt das Digitale Geländemodell des Wasserlaufs des Jahres 2007 (DGM-W 2007; siehe BFG 2008) dar.

> Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Modellkalibrierung werden in BCE (2009) näher erläutert. Die Ergebnisse der Modellierung, die in Kapitel 10 vorgestellt werden, zeigen, dass die ausgewählten 30 Hochwasser hinreichend genau durch das verwendete Modell abgebildet werden.

8 Generierung und Aufbereitung der Modelleingangsdaten

Die Bereitstellung von möglichst hoch aufgelösten hydrologischen Messdaten für die 30 ausgewählten Hochwasserereignisse zwischen 1970 und 2013 (Kap. 5) gehörte zu den wichtigsten und aufwandsintensivsten Bearbeitungsschritten im Projekt. Entsprechend der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Modelllayouts waren für etwa 70 Pegel Abflussganglinien zu beschaffen bzw. zu generieren, die als Eingangsdaten an den Modellrändern oder zur Plausibilisierung der Simulationsergebnisse auf der Modellstrecke Verwendung fanden. Darüber hinaus waren hinreichend genaue Daten zu den Talsperren (Wasserstände, Volumina, Zuund Abflüsse; vgl. Kap. 6) notwendig, um deren Wirkung in den Modellen und Berechnungsverfahren (Kap. 7) erfassen zu können.

Ziel des Recherche- und Aufbereitungsprozesses war es, möglichst Datensätze mit einer stündlichen Auflösung zu generieren, um Wellenlaufzeiten und Scheitelabflüsse detailliert abzubilden und so der Überlagerung von Talsperreneffekten mit der natürlichen Hochwassergenese, vor allem in den oberen, schnell reagierenden Einzugsgebieten (bspw. Moldau- und Saalegebiet) Rechnung zu tragen. Sowohl für das tschechische als auch das deutsche Bearbeitungsgebiet wurde deutlich, dass dieses Ziel nur über eine detaillierte Datenrecherche sowie eine weitergehende Datenprozessierung erreicht werden kann. Welche Datengrundlagen hierfür zur Verfügung standen und wie fehlende Daten digitalisiert, geprüft und schließlich zu hochaufgelösten Datensätzen aufbereitet wurden, wird in den beiden folgenden Kapiteln zuerst für das tschechische (Kap. 8.1) sowie anschließend für das deutsche (Kap. 8.2) Elbegebiet beschrieben.

8.1 Datenrecherche und -aufbereitung in Tschechien

Im Rahmen des Projekts wurden die benötigten Daten für die tschechischen Pegel und Talsperren im Wesentlichen durch das Tschechische Hydrometeorologische Institut (Český Hydrometeorologický Ústav, ČHMÚ) und die Flussgebietsverwaltungen der Elbe, Moldau und Eger (Povodí Labe, Vltavý und Ohře) bereitgestellt. Dabei war das ČHMÚ überwiegend für die Lieferung der Wasserstands- und Abflussdaten an den Pegelstandorten sowie für die Bereitstellung meteorologischer Daten (bspw. zu den Schneeverhältnissen im Einzugsgebiet der Talsperren) verantwortlich. Daten über die Talsperren - hauptsächlich zu deren Steuerung, zu ihren Zu- und Abflüssen sowie über die sich einstellenden Wasserstände in den Stauseen - lieferten die Flussgebietsverwaltungen.

8.1.1 Wasserstands- und Abflussganglinien

Tabelle 8-1 zeigt die generellen Merkmale des zu Projektbeginn digital verfügbaren Datenbestands zu Wasserständen, Abflüssen und Wasseräquivalenten der Schneedecke im tschechischen Modellgebiet. Es ist erkennbar, dass (vergleichbar zur Situation im deutschen Elbegebiet, Kap. 8.2) Verfügbarkeit und zeitliche Auflösung der Messdaten im Zeitraum zwischen 1970 und 2013 deutlich variieren. Während Messdaten (und ihre Auswertungen) vom Beginn des ausgewählten Zeitraums überwiegend in Form analoger Pegelbögen sowie gedruckter Berichte und digitale Daten hauptsächlich in grober zeitlicher Auflösung vorliegen, sind die Daten der 2000er-Jahre überwiegend digital und hochaufgelöst gespeichert.

Tabelle 8-1: Übersicht über Art und zeitliche Auflösung der zu Projektbeginn vorwiegend digital verfügbaren Abfluss-/Wasserstandsdaten im tschechischen Elbeeinzugsgebiet (BALVÍN ET AL. 2017)

Zeitraum	Abf	lüsse	Wasser	stände	Wasseräquivalent der Schneedecke
	Тур	Auflösung	Тур	Auflösung	Auflösung
1970 -		monatlich,		monatlich,	
2000	Scheitelwerte	täglich,	Scheitelwerte	täglich,	7-täglich
2000		(stündlich)		(stündlich)	
2000			Terminwerte"	nicht	
2000 -	Zeitreihen	stündlich	"renniwence	äquidistant	7-täglich
2001			Zeitreihen	stündlich	
2002 – 2013	Zeitreihen	stündlich	Zeitreihen	stündlich	7-täglich

Liegen Ganglinienaufzeichnungen der Jahre vor 2000 für die analysierten Hochwasser in analoger Form auf Pegelbögen vor, dann wurden diese vom ČHMÚ digitalisiert, d. h. eingescannt und die Messwerte abgetragen, und mittels vorliegender Abflusskurven in Abflüsse mit stündlicher Auflösung umgerechnet. Bei Weitem nicht alle benötigten Daten konnten auf diese Weise rekonstruiert werden – nicht mehr auffindbare Pegelbögen oder der Ausfall von Messeinrichtungen, bspw. beim extremen Hochwasser vom August 2002, verursachten teils kürzere, teils längere Datenlücken, deren Schließung die Nutzung der alternativ zur Verfügung stehenden Datenbestände/-formate erforderte.

Zur Verfügung standen für den gesamten Modellierungszeitraum seit 1970 Tagesmittelwerte des Abflusses (TQ), die unter Berücksichtigung der Volumentreue halbautomatisch in Stundenwerte umgerechnet wurden und somit bestehende Lücken füllen konnten (BALVÍN ET AL. 2017). Terminwerte und darüber hinaus existierende Aufzeichnungen von Hochwassern, bei denen die jeweils charakteristischen Veränderungen der Hochwasserwelle (d. h. die "Knickpunkte" der Ganglinie) dokumentiert wurden, fanden ebenfalls Anwendung für den Lückenschluss. Diese Aufzeichnungen besitzen in der Regel zwar keine äquidistanten Zeitschritte; die Wasserstände (und somit die Abflüsse) wurden aber vor allem im Bereich des Wellenscheitels verhältnismäßig häufig gemessen, so dass sich auf ihrer Grundlage ebenfalls verlässliche Abflussganglinien in stündlicher Auflösung interpolieren lassen.

Alle genutzten bzw. generierten Wasserstands- und Abflussganglinien wurden schließlich mit Hilfe gemessener Scheitelwerte sowie im Vergleich zu den vorliegenden Tageswerten (TW bzw. TQ) plausibilisiert (vgl. hierzu das vergleichbare deutsche Verfahren in Kap. 8.2.3). Besonderes Augenmerk wurde bei der Überprüfung der Daten nicht nur auf die zu Grunde liegenden Wasserstände geworfen, sondern auch auf deren Umrechnung mittels vorhandener Abflusskurven. Waren bei winterlichen Ereignissen die Messwerte durch Eisgang beeinflusst, so wurden die Ergebnisse ebenfalls korrigiert (BALVÍN ET AL. 2017). Beispielhaft wird das Vorgehen zur Erstellung von stündlich aufgelösten Daten auf Basis von Tagesmittelwerten für das Hochwasser vom Juli 1981 am Pegel Brandýs in Abbildung 8-1 dargestellt. Tagesmittelwerte (grüne Linie) werden zuerst linear interpoliert (blaue Linie) und dann bei Bedarf und Vorliegen weiterer Kenntnisse (bspw. durch Überprüfung der Volumentreue) nochmals angepasst (rote Linie; vgl. hierzu auch Abb. 8-6).



Abbildung 8-1: Vorgehensweise zur Generierung von Stundenwerten des Abflusses am Pegel Brandýs für das Hochwasser im Juli 1981 auf Basis von Tagesmittelwerten (BALVÍN ET AL. 2017)

8.1.2 Talsperren: Wasserstände, Zu- und Abflüsse

Für die meisten Talsperren in Tschechien ist festzustellen, dass lediglich die Wasserstände der Stauseen gemessen und mittels vorhandener Durchflussbeziehungen darauf basierend Abflüsse aus den Rückhalteräumen abgeleitet und dokumentiert werden. Die Aufzeichnung beider Größen erfolgte zu Beginn des Beobachtungszeitraums mindestens täglich und wird heute überwiegend kontinuierlich in Intervallen von wenigen Minuten durchgeführt. Abflussmessdaten für unterhalb der Talsperren gelegene Pegel bieten die Möglichkeit, die

Angaben des "berechneten" Abflusses aus den Talsperren zu plausibilisieren (BALVÍN ET AL. 2017). Tabelle 8-2 stellt die Verfügbarkeit von Wasserständen sowie Zu-/Abflüssen für die Speicherräume der Moldaukaskade und weiterer Talsperren im Moldau- und Elbegebiet dar.

Tabelle 8-2: Verfügbarkeit und zeitliche Auflösung von Wasserständen, Zu- und Abflüssen für Speicherräume der Moldaukaskade und weiterer Talsperren für alle 30 im Projekt modellierten Hochwasser

Talsperre	Parameter	März 1970	1971 Juli	Dezember 1974	August 1977	Juli 1980	März 1981	Juli 1981	Oktober 1981	Januar 1982	Juni 1986	März 1987	März 1988	März 1993	Dezember 1993	April 1994	Juli 1997	November 1988	März 2000	März 2001	Januar 2002	August 2002	Januar 2003	März 2005	April 2006	August 2006	Dezember 2007	Juni 2009	September 2010	Januar 2011	Juni 2013
	Wasser- stand	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt 1 **	dt1	dt 1 **	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
Lipno	Zufluss	dt24	dt24	-	-	dt12/2*	dt 1 2/2 *	dt 1 2/2 *	dt 1 2/2 *	dt12/2*	dt 1 2/2 *	dt12/2*	±12/2*	dt24	-	dt24	-	-	-	-	-	tt1-dt24 0	dt24	dt1	it12/2*	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
	Abfluss	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	-	-	-	-	-	-	-	-	dt24	-	dt24	dt24	dt1**	dt1	dt1**	tt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
	Wasser- stand	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt2/7	dt1 ••	dt1	dt1**	t1-dt24 c	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
orlik	Zufluss	dt24	dt24	dt24	dt24	18/3* *	18/3* *	18/3	18/3* *	18/3* *	118/3* *	111 2 / 2 *	1112/2*	112/2*	112/2*	112/2*	dt1	-	dt1 ••	dt1	dt1**	t1-dt24 d	1112/2*	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
	Abfluss	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1** 0	dt1** 0	dt1** 0	dt1** 0	dt1** 0	dt1** 0	dt1** 0	dt1** 0	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1	dt1**	lt1-dt24 c	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1-0	dt1	dt1
	Wasser- stand	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1	dt1**	tt1-dt24 o	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
(amýk	Zufluss	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		dt1
_	Abfluss	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1 ••	dt1	dt1**	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
	Wasser- stand	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1	dt1**	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
Slapy	Zufluss	-	-	-	-	dt12/2*	dt 1 2/2 *	dt 1 2/2 *	dt12/2*	dt12/2*	dt24	dt24	dt24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dt1
	Abfluss	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1**	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1	dt1**	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
e	Wasser- stand	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
ěchovi	Zufluss	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dt1**	0-dt1	-	-	-	-	-	-	dt1
Št	Abfluss	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1-dt24	dt1**	dt1-0	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
	Wasser- stand	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1**	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
Vrané	Zufluss	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Abfluss	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	-	-	-	dt24	dt24	dt1	dt1	dt1**	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
	Wasser- stand	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt1	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt1	-	dt1	dt1	dt1-0	dt1	dt1
Švihov	Zufluss	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dt24	dt24	dt24	-	dt24	dt1	dt1	dt1	dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
	Abfluss	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt1	dt1	dt1	dt24	dt1	dt1	dt1-dt7	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
sky	Wasser- stand	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt1-dt24	dt1-dt24	dt24	dt1-dt24	dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
acholu:	Zufluss	L. d	egeno t1 = S	de: tunde	enwe	rte					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dt1-dt24	dt1-dt24	dt1-0	dt1-0	-	-	-	-	-	-
Ŧ	Abfluss	d (g d	t1** : gf. nich t24 =	= "Stu Itäquid Tages	nden istanter swert	werte Zeitsch e	e" vritt)				-	-	-	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
	Wasser- stand	d (2 d	t12/2 Werte t2/7 =	* = " pro Taj = "2-S	12-Stu g;ggf.n tunde	inden ichtäqi nwer	iwert uidsitan te"	e" ter Zeits	chritt)		-	-	-	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt1-dt24	dt24	dt24	dt1-dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1
Římov	Zufluss	(n d (3	naxima t8/3* Werte	17 Wer ** = " pro Taj	te pro Ti 8-Stu g, Zeitsc	ag) nden hritt zw	werte	" 12 Stun	den)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dt1-dt24	-	0-dt24	dt1-0	-	-	-	-	-	dt6-0
	Abfluss	(V Ke	Veitere ombina	Datent tion der	ypen er zuvor b	geben si Seschrie	ch aus c benen D	ler Vatenfor	mate)		-	-	-	dt24	dt24	dt24	dt24	dt24	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1-0	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1	dt1

Ähnlich wie für die thüringischen Talsperren im Detail beschrieben (Kap. 7.2.1), können die tatsächlichen Zuflüsse zu den Rückhalteräumen, die für die Modellierung der Gewässerzustände entsprechend der homogenen Teilzeiträume und für den natürlichen Zustand "1890" initial benötigt werden (vgl. Kap. 6), nur mit Hilfe eines bilanzbasierten Ansatzes unter Zuhilfenahme von gemessenen Wasserständen und "berechneten" Abflüssen aus den Talsperren ermittelt werden. Die Genauigkeit dieses Ansatzes variiert in Abhängigkeit von der Fläche des Stausees sowie der Größe des (ungemessenen) Zuflusses (BALVÍN ET AL. 2017). Lagen belastbare Daten hierzu nicht vor, dann bestand im Projekt zusätzlich die Möglichkeit, über Berechnungen mit N-A-Modellen die benötigten Randbedingungen zu ermitteln.

8.2 Datenrecherche und -aufbereitung in Deutschland

Insgesamt waren für die Abflussmodellierung im deutschen Elbegebiet Daten für 48 Pegel an der Elbe und ihren Zuflüssen zu recherchieren, zu prüfen und für die Anforderungen im Projekt aufzubereiten. Verantwortlich für die Bereitstellung der Daten sind in Deutschland die Pegelbetreiber: an den Bundeswasserstraßen (BWaStr) Elbe, Saale und Havel sind dies die jeweiligen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSÄ) in Dresden, Magdeburg, Lauenburg und Brandenburg, sowie für die weiteren im Modelllayout berücksichtigten Nebenflüsse der Elbe das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), der Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) und die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG).

Lagen die benötigten Pegeldaten für die 30 analysierten Hochwasser in der geforderten, hohen zeitlichen Auflösung bei den Pegelbetreibern oder in der BfG nicht digital vor, so war vertragsgemäß eine Digitalisierung von analogen Aufzeichnungen an den Pegeln (Wasserstandsganglinien) durch die BfG zu veranlassen. Die Digitalisierung beinhaltet in diesem Zusammenhang zwei Teilschritte: das Scannen der in Papierform vorliegenden Pegelbögen und darauf basierend das Umwandeln der digitalen Bildinformation in Zahlenwerte (Wasserstände). Tabelle 8-3 stellt in einer Übersicht die vorgefundene, sehr heterogene Datensituation zu Beginn des Projekts dar. Demnach lässt sich feststellen, dass ab Mitte der 1990er-Jahre bereits große Datenbestände zu gemessenen Wasserständen an den Pegeln der BWaStr digital als Stundenwerte vorlagen. Für die Pegel der Landesgewässer war dies ab Ende der 1990er-Jahre der Fall (hellgrüne Färbung).

Tabelle 8-3 zeigt auch, dass für die Mehrzahl der älteren Hochwasserereignisse bei den Pegelbetreibern analoge Pegelschriebe vorlagen (dunkelgrüne Farbe), die für das Projekt digitalisiert werden mussten. Ihre Überstellung in die BfG verzögerte sich in einigen Fällen, da die genutzten Lagerräume wegen nicht hygienischer Verhältnisse zunächst nicht betreten werden konnten. Aufgrund der vorgenommenen Recherchen muss auch konstatiert werden, dass für einige Pegel und ältere Ereignisse nicht mehr auf die originalen Messunterlagen zugegriffen werden kann, da in diesen Fällen entsprechende Pegelaufzeichnungen in den

> gewässerkundlichen Archiven nicht aufbewahrt werden (rote Farbgebung). In der von der WSV gepflegten hydrologischen Datenhaltung (sog. WISKI-Datenbank: Wasserstandsinformationssystem der Firma Kisters) existieren jedoch für fast alle in Tabelle 8-3 genannten Pegel und Ereignisse auch Angaben zu mittleren Tageswasserständen (Ausnahmen sind in der Tabelle grau gefärbt). Fehlten analoge Pegelbögen, wurden die analogen und digitalen Zeitreihen (Stundenwerte) im Rahmen der Plausibilisierung als nicht belastbar erachtet oder wiesen die hochaufgelösten digitalen Datenbestände Lücken auf, dann konnten auf Basis der Tagesmittelwerte im Zuge der Datenaufbereitung einheitliche, stündliche Datensätze erzeugt werden (Kap. 8.2.3).



Tabelle 8-3: Zu Projektbeginn vorliegende gemessene Wasserstände an Pegeln der Elbe und Zuflüssen

(*bis 1986: Pegel Bad Blankenburg / ab 1987: Pegel Schwarzburg)

8.2.1 Digitalisierung von Pegeldaten der Elbe und ihrer Nebenflüsse

Im Auftrag der BfG wurden im Rahmen einer Vergabe (TANDLER 2014) die analogen, von den Pegelbetreibern für die benötigten Zeiträume bereitgestellten Pegelschriebe gescannt und hochaufgelöst als Stundenwerte digitalisiert, um diese nach erfolgter Qualitätssicherung den elektronischen Datenhaltungen der WSV und der Länder zuzuführen. Anhand der dunkelgrün gefärbten Felder in Tabelle 8-3 kann festgestellt werden, welche Dienststellen des Bundes und der Bundesländer analoge Pegelbögen für die Digitalisierung bereitgestellt haben. Die Originalpegelaufzeichnungen waren von sehr unterschiedlicher Qualität. Stellvertretend zeigen die Abbildungen 8-2 und 8-3 ausgewählte Beispiele für Pegelbögen, auf denen die
Wasserstandsaufzeichnungen noch gut erkennbar (Pegel Dresden/Elbe, Hochwasser im März/April 1993) bzw. eher schlecht lesbar sind (Pegel Naumburg-Grochlitz/Saale, Hochwasser im Dezember 1969).



Abbildung 8-2: Analoge, gut digitalisierbare Pegelaufzeichnungen am Pegel Dresden (Elbe) für das Hochwasser vom März 1993 (22.-29.03.1993)

Insgesamt waren nach den Vorgaben der BfG vom Auftragnehmer ca. 7.000 Pegelbögen, Pegelrollen oder Schreibstreifen zu digitalisieren. Hierbei traten wegen des teilweise schlechten Zustands der Originalaufzeichnungen mannigfaltige Schwierigkeiten auf. Bei lückenhaften, verschwommenen oder verblassten Wasserstandsganglinien (Abb. 8-3) bzw. bei fehlenden Achsenskalierungen mussten Annahmen zur Generierung der hoch aufgelösten Ganglinien getroffen werden. Hierzu konnten die vielfach auf den Pegelbögen eingetragenen Tageswerte des Wasserstands herangezogen werden. Alternativ war auch ein Anschluss der Linie an das vorangehende bzw. nachfolgende Pegelbogenblatt möglich.

Häufig war im Zuge der Digitalisierung ein Wechsel in der Skalierung der Ordinatenachse und bei großen Hochwassern die Umkehr/Spiegelung der Werte in den Wasserstandsaufzeichnungen zu beachten. Wertvolle Hilfen stellten bei offensichtlich implausiblen Messungen die häufig zu späteren Zeitpunkten vorgenommenen, handschriftlichen Korrekturen der Wasserstandsverläufe dar, die bei Bedarf berücksichtigt wurden. Der Anteil solcher schlecht digitalisierbarer bzw. auswertbarer Pegelbögen betrug schätzungsweise ca. 50 % am Gesamtumfang der zu digitalisierenden Pegelschriebe.



Abbildung 8-3: Analoge, schlecht digitalisierbare Pegelaufzeichnungen am Pegel Naumburg-Grochlitz (Saale) für einen Zeitraum im Dezember 1969 (08.-15.12.1969)

Aus dem Prozess zur Bereitstellung und Digitalisierung von analogen Pegelaufzeichnungen lässt sich abschließend resümieren, dass in der Vergangenheit von den Pegelbetreibern der Archivierung solcher originärer hydrologischer Daten unterschiedliche Bedeutung beigemessen wurde. Da die an Pegeln erhobenen Messdaten u. a. wesentliche Grundlagen für sämtliche hydrologische Auswertungen und weitergehenden Planungen darstellen, sollte überall mit hoher Priorität und Anstrengung eine nachhaltige Archivierung analoger Messdaten angestrebt werden.

8.2.2 Plausibilisierung der vorliegenden Messdatengrundlage

In den gewässerkundlichen Dienststellen in Deutschland ist gelebte Praxis, gemessene, an Pegeln erhobene Rohdaten vor ihrer weiteren Verwendung zu plausibilisieren, um so deren Qualität zu sichern. Eine sorgfältige Plausibilisierung der erfassten Daten war auch im vorliegenden Projekt geboten und erfolgte sowohl durch den Auftragnehmer im Zuge der Datendigitalisierung als auch im Nachgang im Rahmen der Modelldatenaufbereitung und Modellierung in der BfG.

Zunächst wurden die erfassten Daten auf Vollständigkeit geprüft. So wurden zahlreiche Lücken in den digitalisierten Ganglinien identifiziert, die nachfolgend mit Hilfe der in der WISKI-Datenbank (WISKI-DB) digital vorliegenden Tageswerte geschlossen werden konn-

ten (Kap. 8.2.3). Nach der Vollständigkeitskontrolle wurden die digitalisierten, stündlichen Wasserstandswerte in die WISKI-DB übernommen. Dort wurden daraus Tageswerte berechnet, die dann zur Überprüfung der Plausibilität mit den offiziellen (geprüften) Tageswerten der WISKI-DB verglichen wurden. Dem ausgewerteten Pegelschrieb am Pegel Dresden vom März 1993 (Abb. 8-2) können handschriftliche Eintragungen des Pegelbetreibers zu den Tageswerten entnommen werden, was einen weiteren Vergleich dieser Tageswerte mit den entsprechenden Tageswerten aus der digitalisierten Ganglinie ermöglicht. Bei Abweichungen zwischen den digitalisierten und offiziellen Tageswerten größer als 5 cm wurde die vorgenommene Digitalisierung vom Auftragnehmer nochmals überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Bei Diskrepanzen zwischen den Tageswerten, für die keine Ursache aufgrund des Digitalisierungsprozesses feststellbar war, wurden die vorliegenden, unterschiedlichen Daten zur Klärung und Abstimmung an die jeweiligen Pegelbetreiber übermittelt. Hierdurch konnten weitere Verbesserungen erreicht werden: so wurden bspw. bisher offizielle Tagesmittelwerte in der WISKI-DB als nicht plausibel und nachweislich fehlerhaft bewertet und durch die neu digitalisierten Werte ersetzt.



Abbildung 8-4: Prüfung der digitalen Tageswerte (Hochwasser 1977) am Pegel Aken auf Plausibilität

Abbildung 8-4 zeigt am Beispiel des Hochwassers vom August 1977 für den Pegel Aken die Diskrepanzen zwischen den Tageswerten aus den digitalisierten Pegelschrieben und den offiziellen Tageswerten in der WISKI-DB. Die ermittelten Abweichungen betragen im ablaufenden Ast der Welle konstant mehr als 40 cm. In diesem Fall wurden nach Abstimmung mit dem Pegelbetreiber die bisherigen Tageswerte in der WISKI-DB durch die aus der Digitali-

> sierung hervorgegangenen Tageswerte ersetzt. Aufgrund des relativ kurzen Digitalisierungszeitraumes war es jedoch generell nicht möglich, Aussagen zu treffen, für welche Zeiträume in der WISKI-DB die festgestellten Abweichungen vorhanden sind. Diese Klärung herbeizuführen, obliegt dem Pegelbetreiber und war nicht Aufgabe des vorliegenden Projekts. Insgesamt wurden für 9 Pegel (Aken, Wittenberg und Wittenberge an der Elbe sowie für sechs Pegel an der Saale bzw. im Saaleeinzugsgebiet) bei verschiedenen Hochwassern die Tageswerte in der WISKI-DB korrigiert.

> Im nächsten Schritt wurden mit Hilfe der gültigen Abflusskurven die nunmehr stündlich vorliegenden, digitalisierten Wasserstandsdaten in stündliche Abflussdaten umgerechnet. Zu diesem Zweck stellten die zuständigen Stellen der WSV und der Bundesländer die für diese Ereignisse in den Archiven vorhandenen, gültigen Abflusskurven der Pegel zur Verfügung. Da nicht für alle Ereignisse die benötigten Kurven vorhanden waren, wurde in Abstimmung mit den Pegelbetreibern die Methode nach ISO 1100/2 (1998) zur Generierung von fehlenden Kurven und zur Extrapolation vorhandener Kurven angewendet.

	Pegelbetreiber	Kurve (Nr.)		verlängert		
Pegel (Gewässer)			Gültigkeit	von	bis	Verfahren
Kaulsdorf-Eichicht (Saale)	TLUG	26	01.11.1981 - 31.10.1986	180	240	grafisch verlängert an Kurve 28
Saalfeld-Remschütz (Saale)	TLUG	6	01.01.1970 - 31.10.1983	270	310	ISO-Formel
Rothenstein (Saale)	TLUG	7	01.11.1975 - 31.10.1990	240	406	grafisch verlängert an Kurve 6.1
Naumburg-Grochlitz (Saale)	LHW Sachsen-Anhalt	7	01.11.1981 - 31.10.1993	550	555	grafisch verlängert
Halle-Trotha (Saale)	WSA Magdeburg	6	01.10.1982 - 01.06.1992	400	620	ISO-Formel
Calbe-Grizehne (Saale)	WSA Magdeburg	4	01.02.1969 - 31.10.1984	390	700	ISO-Formel
Mertendorf	LHW Sachsen-Anhalt	4	01.01.1970 - 01.01.1973	100	220	ISO-Formel
(Wethau)		5	01.01.1973 - 01.10.1982	100	220	ISO-Formel
Zappendorf (Salza)	LHW Sachsen-Anhalt	4a	01.11.1975 - 31.10.1987	165	220	ISO-Formel
Löben (Schwarze Elster)	LHW Sachsen-Anhalt	neu	01.11.1974 - 31.10.1984	50	270	ISO-Formel

Tabelle 8-4: Übersicht über die für die Verwendung im Projekt verlängerten Abflusskurven im Saalegebiet und an der Schwarzen Elster

Die verwendete Methode erstellt basierend auf den vorliegenden Wasserstands- und Abflusszeitreihen (zumeist bestehend aus Tageswerten) mit Hilfe einer Potenzregression eine Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss am jeweiligen Pegelstandort. Die so ermittelte Abflusskurve kann dann verwendet werden, um notwendige Umrechnungen von digitalisierten Wasserstandswerten zu ermöglichen. Waren vorliegende Abflusskurven im Hochwasserast nur geringfügig zu erweitern, dann wurden in Einzelfällen die notwendigen Extrapolationen mittels eines grafischen Verfahrens durchgeführt. Nach Abstimmung mit den Pegelbetreibern wurden die veränderten bzw. erzeugten Abflusskurven im Anschluss für die Abflussermittlung angewendet. Tabelle 8-4 zeigt in einer Übersicht, für welche Pegel und nach welcher Methode Abflusskurven neu erstellt oder verlängert wurden. Teilweise mussten vorhandene Kurven nur um wenige Zentimeter verlängert werden, jedoch beträgt in einigen Fällen der nicht durch Abflussmessungen abgedeckte Extrapolationsbereich bis zu über 2 m (Pegel Halle-Trotha/Saale und Calbe-Gritzehne/Saale).

Aufgrund von Veränderungen im Flussbett bzw. im Vorland besitzen Abflusskurven in der Regel zeitliche Gültigkeiten. Abbildung 8-5 zeigt die vom LHW Sachsen-Anhalt für den Pegel Löben an der Schwarzen Elster bereitgestellten sieben Abflusskurven mit entsprechenden Gültigkeitsdauern ab dem 01.11.1986. Auch die im Zuge des Projekts neu erstellte Abflusskurve für den Zeitraum von 1974-1986 ist hierin dargestellt. Die Entwicklung der Abflusskurven seit 1974 lässt auf erhebliche Änderungen der Durchflussverhältnisse in der Umgebung des Pegels Löben schließen. Da insbesondere für Hochwasserabflüsse die sich einstellenden Wasserstände deutlich angestiegen sind, ist hier von einer erheblich verminderten Leistungsfähigkeit des Pegelprofils auszugehen. Im Zuge des vorliegenden Projekts wurden Untersuchungen zur Überprüfung der Genauigkeit von verwendeten Abflusskurven nicht durchgeführt. Sie wurden angewendet wie bereitgestellt bzw. vereinbart.



Abbildung 8-5: Bereitgestellte (1986 bis heute) und für das Projekt erzeugte (1974 bis 1986) Abflusskurven für den Pegel Löben (Schwarze Elster)

> Als weiteren Anhaltspunkt zur Beurteilung der Qualität der digitalisierten Stundenwerte sowie der verwendeten Abflusskurven kann die Stimmigkeit der Abflussbilanz entlang der Elbe ausgewertet werden. In der Abflussbilanzierung werden die ereignisbezogenen Abflusssummen benachbarter Elbepegel in Beziehung zueinander gesetzt. Dies erfolgte auch für alle 30 ausgewählten Hochwasserereignisse zwischen 1970 und 2013. Um den Volumenerhalt zu prüfen, sollten in der Bilanzierung die Hochwasser in ihrem gesamten zeitlichen Ablauf vom stationären Anfang bis zum stationären Ende - berücksichtigt werden. Für jede Elbestrecke zwischen benachbarten Pegeln wird zunächst die Abflusssumme am oberstrom gelegenen Elbepegel und die Abflusssummen aller mündenden Zuflüsse miteinander addiert und diese danach mit der Abflusssumme am unterstromigen Elbepegel verglichen. Ergeben sich große Differenzen in der Bilanz der Abflusssummen zwischen zwei Elbepegeln, dann könnten diese als Indiz für die Verwendung ungenauer Abflusskurven oder nicht belastbarer Wasserstandsganglinien verstanden werden. Aufgrund der integralen Herangehensweise dieser Methode und der Vielzahl von Einflussgrößen (gemessene Wasserstände, Abflusskurven, Bilanzierungszeiträume, Interaktion mit Grundwasser, Entnahmen, Zugaben, Wellenlaufzeiten etc.) sind eindeutige Hinweise und Rückschlüsse auf Implausibilitäten nur möglich, wenn die Befunde in der Gesamtschau über größere Strecken einen stimmigen hydrologischen Zusammenhang ergeben.

> Basis der vorgenommen Untersuchungen sind die stündlichen Abflussganglinien der ausgewählten Hochwasserereignisse. Im Ergebnis der Bilanzuntersuchungen konnten große Diskrepanzen in der Abflussbilanzierung ab Ende der 1970er-Jahre bis Anfang der 1990er-Jahre insbesondere für den Pegel Torgau an der oberen Mittelelbe festgestellt werden (OPPERMANN ET AL. 1994). Diese deuten hier auf eine Erosion von bis zu 1,5 cm/Jahr hin, deren Effekte in den offiziellen, verwendeten Abflusskurven nicht genau berücksichtigt erscheinen. In diesem Zusammenhang wird auf die umfangreiche Untersuchung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Projekt "W-Q-1890 Elbe" verwiesen (vgl. Kap. 3.3 sowie HELMS ET AL. 2016B). Aufgrund der im vorliegenden Projekt vorgenommenen Bilanzuntersuchungen wurden Änderungen an den aus der Digitalisierung hervorgegangenen stündlichen Wasserständen und verwendeten Abflusskurven nicht für erforderlich gehalten und nicht vorgenommen.

8.2.3 Generierung von stündlichen Datensätzen

In Deutschland werden heute an allen hydrologisch bedeutsamen Pegeln die Wasserstände kontinuierlich und digital erfasst. So war die Anforderung nach einer hohen zeitlichen Auflösung der Eingangsdaten für jüngere Hochwasserereignisse ausnahmslos erfüllt (Tab. 8-3). Aus den bereitgestellten analogen Pegelschrieben konnten im Zuge der Digitalisierung ebenfalls stündliche Wasserstände ermittelt und entsprechende Abflussganglinien generiert werden (Kap. 8.2.2). Für ältere Hochwasser waren teilweise nicht mehr die originalen Pegelaufzeichnungen vorhanden oder auffindbar. Da diese jedoch in der Vergangenheit von den Pegelbetreibern für Nachnutzungen gewässerkundlich ausgewertet wurden, stehen für diese Zeiträume zwar nicht mehr die analogen Pegelschriebe, jedoch die so ermittelten Tageswerte des Abflusses (TQ) in der WISKI-DB zur Verfügung. Diese können somit nicht nur zur Plausibilisierung der aus analogen Aufzeichnungen ermittelten Stundenwerte (vgl. Kap. 8.2.2), sondern auch zur Ermittlung von Stundenwerten selbst herangezogen werden.

Tabelle 8-5 gibt eine Übersicht über die nach Abschluss der Digitalisierung verfügbaren Stundenwerte des Abflusses (grün gekennzeichnet) und über Zeiträume mit TQ-Werten in der WISKI-DB (rot markiert), aus denen Stundenwerte abgeleitet wurden.

Tabelle 8-5: Verfügbare stündliche Abflüsse bzw. Tageswerte an Elbe- und Nebenflusspegeln sowie Hinweise auf Datenlücken nach Ende des Digitalisierungsprozesses analoger Pegelunterlagen (mit Stern markierte Felder zeigen Pegel/Zeiträume, bei denen (trotz Vorliegen digitaler Stundenwerte) auf tageswertbasierte Daten zurückgegriffen werden musste)



(**bis 1986: Pegel Bad Blankenburg / ab 1987: Pegel Schwarzburg

Lediglich für sechs Zeiträume/Pegel war es aufgrund von fehlenden Pegelbögen bzw. fehlenden Tageswerten in der WISKI-DB nicht möglich, die erforderlichen stündlichen Abflussganglinien zu beschaffen (in Tabelle 8-5 grau markiert). Dies betrifft die Hochwasser im März 1970 und Juli 1971 an den Pegeln Oberthau/Weiße Elster und Löben/Schwarze Elster, das Hochwasser im März 1970 am Pegel Wilsdruff/Wilde Sau sowie das Hochwasser im August 2002 am Pegel Mertendorf/Wethau. Für diese Pegel und Ereignisse wurden die jeweiligen Abflussganglinien über Differenzbetrachtungen zwischen ober- und unterstrom gelege-

> nen Pegeln oder über Analogieschlüsse zu benachbarten Pegeln (unter Betrachtung der Einzugsgebietsgröße) abgeschätzt.

> Nach einem in der BfG im Zuge des von der EU kofinanzierten Projekts "LAHOR" entwickelten Verfahren wurden sämtliche als Tageswerte vorliegenden Abflussganglinien in Stundenwerte überführt (BFG 2002A). Hierzu wurden die TQ(t)-Ganglinien zunächst integriert und der V(t)-Integralverlauf (Volumenkurve) mit einer geglätteten, in Stundenwerte aufgelösten Kurve interpoliert. Die geglättete V(t)-Kurve darf hierbei keine negativen Gradienten aufweisen und muss durch alle Stützstellen des zeitlich grob aufgelösten Integrals verlaufen. Aus der Rückdifferenzierung des geglätteten Integrals ergibt sich die integralerhaltend interpolierte stündliche Abflussganglinie Q(t). Abbildung 8-6 zeigt beispielhaft eine Tageswertganglinie des Abflusses am Pegel Tangermünde (Hochwasser im Dez. 1993/Jan. 1994), die mit Hilfe des beschriebenen Verfahrens in interpolierte Stundenwerte des Abflusses überführt wurde.



Abbildung 8-6: Integralerhaltende Interpolation von Tageswerten des Abflusses am Pegel Tangermünde auf Stundenwerte (Hochwasser Dezember 1993 / Januar 1994)

Das Verfahren zur Ermittlung von hoch aufgelösten Abflussganglinien wurde nicht nur für Ereignisse mit fehlenden analogen Messdaten, für die in der WISKI-DB Tageswerte des Abflusses digital vorgehalten werden, angewendet. Es kam auch immer dann zum Einsatz, wenn die verfügbaren digitalen bzw. analogen Pegelunterlagen lückenhafte Aufzeichnungen von Messdaten beinhalteten. Insbesondere ältere Zeiträume an 22 Pegeln der Elbe bzw. Nebenflüsse waren hiervon betroffen. Datenausfälle über einige Tage bis hin zu zwei Monaten wurden registriert und mussten durch die interpolierten, vorliegenden TQ-Werte in der WISKI-DB gefüllt werden. Tabelle 8-5 kennzeichnet diese Zeiträume mit Datenlücken mit Hilfe eines Sterns.

Zusammenfassend wird festgestellt: Dienststellen der WSV und der Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer haben für 30 ausgewählte, zwischen 1970 und 2013 abgelaufene charakteristische Hochwasser im Elbegebiet umfangreiche digitale bzw. analoge Messdaten an Pegeln der BfG für die großräumige Abflussmodellierung im Homogenisierungsprojekt bereitgestellt. Fehlende Originalunterlagen und lückenhafte Aufzeichnungen konnten durch die in der WISKI-DB enthaltenen Tageswerte des Abflusses gefüllt und mit Hilfe eines Interpolationsverfahrens in hoch aufgelöste Abflussganglinien überführt werden. Die durchgeführten Prüfungen der Plausibilität der zusammengestellten Datensätze belegen insgesamt die hochwertige Qualität dieser hydrologischen Grundlagendaten. Sie bilden das unverzichtbare Datengerüst für die großräumigen mathematischen Abflussberechnungen im Elbegebiet zum Nachweis der Wirkungen des Betriebs von großen Talsperren an Moldau, Eger und Saale auf Hochwasser der Elbe in Deutschland. Die Daten stehen über das Homogenisierungsprojekt hinaus dem Bund und den Ländern für einzugsgebietsbezogene Hochwasseruntersuchungen, beispielweise im FuE-Vorhaben zur wissenschaftlichen Begleitung des Nationalen Hochwasserschutzprogramms (NHWSP), zur Verfügung.

8.2.4 Daten für die Talsperren der Saalekaskade

Zur Ermittlung der Wirkung der Saalekaskade wurden von der TLUG bzw. vom Talsperrenbetreiber *Vattenfall* folgende täglich aufgelösten Daten zu den Talsperren bereitgestellt und entsprechend der in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Vorgehensweise weiterverarbeitet:

- Talsperren-Inhaltsganglinien (Füllstände als Volumina) für die Talsperren Bleiloch, Hohenwarte (ohne Oberbecken), Burgkhammer, Eichicht, Walsburg und Wisenta für alle 30 analysierten Ereignisse; darüber hinaus stündlich aufgelöste Inhaltsganglinien aller Talsperren für die Hochwasser vom April 2006 und Juni 2013
- Ganglinien der Talsperrenabgabe (Tageswerte) für den Zeitraum vor 1993
- Abflussganglinien für den Pegel Kaulsdorf/Saale (Tageswerte und Stundenwerte) für alle 30 untersuchten Hochwasser
- Abflussganglinien für den Pegel Blankenstein-Rosenthal als Tageswerte (Gesamtzeitraum) und Stundenwerte (ab 2001)

Die bereitgestellten Daten, die nur wenige Lücken aufwiesen, wurden im Rahmen der in Kapitel 7.2.1 erläuterten Bearbeitung (so weit wie möglich) auf Plausibilität geprüft; relevante Lücken oder festgestellte Implausibilitäten verblieben nicht. Bundesanstalt für Gewässerkunde

> Bericht BfG-1938

9 Weitere anthropogene Maßnahmen im deutschen Elbegebiet und ihre Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse

Die bis heute durchgeführten Untersuchungen zur Wirkung der großen Talsperren im Elbegebiet (u.a. BFG 2012, BFG 2013, IKSE 2009), die u. a. Anlass für das in diesem Bericht vorgestellte Projekt waren, belegen, dass an der Elbe Unterlieger durch Rückhaltungen bei den Oberliegern - in einem Ausmaß wie vermutlich an keinem anderen großen Gewässer in Deutschland - profitieren können. Der Rückhalt in den Talsperren verursacht diesbezüglich allerdings auch eine erhebliche Inhomogenität in den verwendeten langen HQ-Reihen (1890-2013) für Elbepegel in Deutschland (vgl. Kap 3.2 und 3.3).

Da im Elbegebiet in der Vergangenheit - zusätzlich zum Bau der Talsperren - weitere anthropogene Einflüsse auf die Abflussverhältnisse gewirkt haben (und immer noch wirken), stellte sich im Vorhaben die Frage, ob die zwischen 1932 und 1968 erfolgten großen Baumaßnahmen durch Talsperren (Kap. 2.4 und Kap. 6) die einzigen nennenswerten Quellen für Inhomogenitäten der HQ-Reihen darstellen. Bei "Vorliegen signifikanter Änderungen im Hochwasserablauf [wäre es ebenfalls notwendig, die Wirkungen (d. h. HQ-Änderungen) weiterer Einflüsse] im Zuge der Homogenisierung der langen HQ-Reihen 1890-2013 zu berücksichtigen" (BFG ET AL. 2013B). Unter den vielfältigen anthropogenen Einflüssen nennt IKSE (2005) - zusätzlich zu den Talsperren - den historischen Deichbau zum Hochwasserschutz, die Laufverkürzung und Begradigung der Elbe für die Schifffahrt sowie die veränderten Landnutzungen als wichtige Faktoren, die den Wellenablauf sowie die Scheitelabflüsse der Hochwasser tiefgreifend verändern können.

Mit Verweis auf die Vorhabensbeschreibung (BFG ET AL. 2013) hatte die projektbegleitende deutsch-tschechische Expertengruppe zu Beginn des Projekts entschieden, zusätzlich zu den Wirkungen der Talsperren die oben genannten anthropogenen Einflüsse mit in Betrachtung durch das Projekt einzubeziehen. Dabei standen die Veränderungen im Elbevorland, die in den letzten Jahrzehnten durch Sedimentations- und Verbuschungsprozesse (vgl. Kap. 9.1) offensichtlich wurden, ebenso im Vordergrund wie der Verlust von Hochwasserrückhalteraum durch die Eindeichung von Überschwemmungsflächen an der Elbe und in mündungsnahen Bereichen der Nebenflüsse (Kap. 9.2). Um zum aktuellen Kenntnisstand bzw. zu möglichen Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse bei Hochwasser im Projekt eine qualitative Einschätzung liefern zu können, erfolgten Literaturstudien und Datendigitalisierungen sowie

(für ausgewählte Beispiele) modellbasierte Wirkungsabschätzungen. Ihre Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

9.1 Erkenntnisse zum Einfluss veränderter Vorlandtopographien und Vegetationsstrukturen an der Elbe auf Hochwasser

Die natürlichen Überschwemmungsflächen der Elbe wurden schon seit dem Beginn des Deichbaus im 12. Jahrhundert (KRÜGER ET AL. 2006) in das weiterhin vom Hochwasser beeinflusste Vorland und das nunmehr geschützte Binnenland geteilt. Im Binnenland wurde die Dynamik der fluvialen Sedimentations- und Erosionsprozesse damit gestoppt, jedoch führten auch in den Vorländern die neuen Strömungsregime zu veränderten Prozessen, die sich in der Aufhöhung vieler Vorlandflächen niedergeschlagen haben. Insbesondere seit dem Elbe-Hochwasser vom August 2002 steht die Frage im Raum, ob die Vorlandaufhöhungen seit Ende des 19. Jahrhunderts zu einer spürbaren Verringerung der abflusswirksamen Querschnittsfläche und damit zu einer Erhöhung der Scheitelwasserstände geführt haben (ROM-MEL 2003, KRÜGER ET AL. 2006). Auch hier muss zwischen lokalen, stationären und überregionalen, instationären Auswirkungen auf Wasserstände und Abflüsse unterschieden werden. Im Rahmen des Vorhabens zur Homogenisierung der langen HQ-Reihen wäre solch ein Effekt von Bedeutung, wenn mit diesen Veränderungen im Elbevorland gleichzeitig eine erhebliche Veränderung des großräumigen Hochwasserwellenablaufs und infolge eine Veränderung der Scheitelabflüsse einhergehen würde und sich diese Scheiteländerungen quantitativ und zeitraumbezogen in den HQ-Reihen beschreiben ließen. Für Pegelstandorte wird davon ausgegangen, dass diese lokal abflusswirksamen Effekte (wenn vorliegend) durch angepasste Abflusskurven und somit in den HQ-Reihen berücksichtigt sind.

Insgesamt wird die Vorlandsedimentation durch verschiedene Prozesse beeinflusst. Hierbei spielt der Sedimenteintrag ins Gewässer und damit die zur Verfügung stehende Sedimentmenge eine wichtige Rolle, die von gewässermorphologischen (u. a. Tiefen-/Seitenerosion), hydrometeorologischen (bspw. Häufigkeit von Starkniederschlägen), natürlichen (Relief, Bodenart) und anthropogenen Faktoren (Landnutzung, künstlichen Senken wie Talsperren) abhängt. Wieviel des bei einem Hochwasser mitgeführten Sediments sich auf dem Vorland ablagern kann, wird dabei u. a. von der Sedimentkonzentration und der Überflutungsdauer bestimmt. Langjährige Mittelwerte der Schwebstoffkonzentration (hauptsächlich die Suspensionsfracht verursacht die Ablagerungen) der deutschen Binnenelbe liegen im Bereich von ca. 15-20 g/m³, wobei während Hochwasserereignissen auch Werte von mehreren 100 g/m³ erreicht werden können (RECKNAGEL ET AL. 2017). Wo auf den Vorländern sich Sediment ablagert, entscheidet dann die lokale morphologische Situation und die dortigen Fließgeschwindigkeiten / Strömungsverhältnisse (große Ablagerungen bspw. in Ruhezonen mit starker Abnahme der Strömung).

Im Rahmen einer Literaturstudie für das Homogenisierungsprojekt führten RECKNAGEL ET AL. (2017) den aktuellen Kenntnisstand zur messtechnischen Erfassung der Sedimentation, an der Elbe bisher zur Verfügung stehenden Datenbeständen und ihrer Auswertung zusammen. Es wurde festgestellt, dass seit Beginn der 1990er Jahre an der Elbe lokal viele Untersuchungen zur Vorlandsedimentation durchgeführt wurden. Beispielsweise bestimmte ROMMEL (2010) auf Basis historischer Querprofildaten an verschiedenen Standorten mittlere jährliche Sedimentationsraten von 0,05 cm/a bis 1,0 cm/a über einen Zeitraum von etwa 100 Jahren hinweg. Für Uferwälle wurde im gleichen Zeitraum sogar eine Aufhöhung zwischen 1,6 m und 2 m dokumentiert. Allen in der Literaturstudie genannten Untersuchungen ist die Aussage gemeinsam, dass die Komplexität des Mikroreliefs und die Vielzahl möglicher Einflussfaktoren kleinräumig variierend zu sehr unterschiedlichen Sedimentationsraten führen können bzw. geführt haben. Aufgrund der schlechten Datengrundlage für lange historische Zeiträume sind Geländehöhenvergleiche aufwändig und mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Die Autoren der Literaturstudie kommen zum Fazit, dass Messungen darauf hinweisen, dass insgesamt seit Ende des 19. Jahrhunderts eine Aufhöhung der Vorländer stattgefunden hat. Die ermittelten Werte reichen von jährlichen Zunahmen im Millimeterbereich bis hin zu zwei Zentimetern pro Jahr. Die übergreifende Quantifizierung der Geländehöhenänderung für das gesamte Überschwemmungsgebiet der Elbe ist gegenwärtig jedoch nicht möglich, da Messungen lediglich an Teilabschnitten der Elbe vorgenommen wurden. Die Heterogenität der steuernden Prozesse führt zu einer hohen kleinräumigen Variabilität der Geländeaufhöhungen, so dass vorhandene punkthafte Messungen für eine sinnvolle Interpolation oft nicht ausreichen (RECKNAGEL ET AL. 2017). Zur Ableitung belastbarer Zahlen zu Vorlandaufhöhungen entlang der Elbe sind weitere Messungen sowie die Weiterentwicklung gekoppelter hydrodynamischer Sedimenttransport-Modelle sinnvoll (RECKNAGEL ET AL. 2017). Auf deren Erkenntnisse aufbauend, könnten dann Modellsimulationen neues Wissen zur Beeinflussung des großräumigen Wellenablaufs an der Elbe durch die Vorlandveränderungen generieren. Bisher ist aufgrund von modellbasierten Berechnungen lediglich gesichert, dass morphologische Maßnahmen in Gewässervorländern (Vorlandabtragungen, Flutrinnen) lokal bis regional Auswirkungen auf Scheitelwasserstände besitzen (BFG 2015).

Vergleichbar zum Kenntnisstand bezüglich der Veränderung von Vorlandtopographien verhalten sich die Erkenntnisse hinsichtlich der Auswirkungen der Vegetationsstrukturen. Messdatenbasierte Analysen für Elbepegel, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden, erbrachten keine neuen Erkenntnisse zur generellen zeitlichen Veränderung des Wellenablaufs der Elbe seit Ende des 19. Jahrhunderts. Hierzu wurden (überwiegend auf Basis von Tageswerten) charakteristische Veränderungen von Ganglinienform (Ansteigen / Abfallen der Welle, Wellenform, Scheiteldauern) und Wellenlaufzeiten für historische Hochwasserereignisse analysiert. Die gewonnenen Ergebnisse zeigten (auch auf aufgrund des geringen Datenumfangs) weder eine klare hydrologisch-hydraulische Veränderungstendenz noch wa-

> ren sie statistisch signifikant. Sensitivitätsuntersuchungen unter Verwendung von Szenarien mit extrem veränderten (im historischen und regionalen Kontext teilweise unrealistischen) Vorlandrauheiten (Rauheitsbeiwerte im Modell extrem glatt [nur Gras] bzw. extrem rau [nur Wald]; vgl. Abb. 9-1), die von der BfG im Rahmen des Projekts zur "2D-Modellierung an der Unteren Mittelelbe zwischen Wittenberge und Geesthacht" (BFG 2015) durchgeführt wurden, zeigen ebenfalls keine signifikanten Änderungen der Scheitelabflüsse, jedoch deutliche Scheitelwasserstandänderungen und veränderte Eintrittszeitpunkte der Scheitelwerte. Dabei wurde im Fazit der Untersuchung jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei den gewählten Szenarien um Extremzustände handelt, die aufgrund der Bedeutung des Gebietes als Biosphärenreservat vollkommen unrealistisch sind. Die Berechnungen mit dem 2D-Modell konnten jedoch die Spannweite maximal möglicher Beeinflussungen der Vegetationszustände auf Hochwasserabläufe aufzeigen. Wichtig ist dabei abschließend festzustellen, dass das Retentionsverhalten im Wellenablauf von bedeutenden Elbehochwassern aufgrund unterschiedlicher Vegetationsverhältnisse nur wenig verändert wird und dabei auch keine signifikante zeitliche Umverteilung der Abflüsse stattfindet, d. h. die Form der Ganglinie bleibt bei allen untersuchten Szenarien im Wesentlichen unverändert.



Abbildung 9-1: Verlauf der gemessenen Wasserstandganglinie des Hochwasser 2000 am Pegel Neu Darchau im Ist-Zustand (gestrichelte Linie) sowie der modellierten Wasserstandganglinie für den Ist-Zustand (blau), den "glatten" Zustand "nur Gras" (grün) sowie den "rauen" Zustand "nur Wald" (rot) und ermittelte Scheitelzeitpunkte (BFG 2015)

9.2 Verlust und Rückgewinnung von Überschwemmungsgebieten an der Elbe seit 1890

Während für die im vorangegangenen Kapitel erläuterten naturräumlichen Veränderungen (Sedimentation, Vegetationsentwicklung) derzeit keine bedeutenden Einflüsse auf die Scheitelabflüsse und den Wellenablauf der Elbe konstatiert werden können, hebt M. Simon in einem bereits 1996 publizierten Artikel hervor, dass "der positive Einfluss der Talsperren auf das Hochwasserabflussverhalten unterhalb von Magdeburg durch die Folgen der Eindeichungen aufgehoben wird" (SIMON 1996). Gemäß seinen Angaben gingen für ein 100-jährliches Hochwasser durch den Deichbau an der Elbe und den mündungsnahen Nebenflussbereichen im Zeitraum zwischen 1915 und 1990 Retentionsflächen in der Größe von 691.46 km² verloren, was zu einen maximalen Verlust von 761 Mio. m3 Speichervolumen in den Vorländern (stationäre Methode zur Ermittlung des Volumens ist zu berücksichtigen) führen kann (IKSE 1996). Bereits zuvor im Jahr 1983 wurde diese Fragestellung im Rahmen von Arbeiten der damaligen Wasserwirtschaftsdirektion Magdeburg (SIMON 1983) verfolgt, konnte jedoch auf Basis von extremwertstatistischen Berechnungen für Pegel an der unteren Mittelelbe aufgrund vorliegender kurzer Zeitreihen nicht bzw. nur teilweise für extremwertstatistische Abflüsse im Bereich < HQ₅₀ bearbeitet/quantifiziert werden (vgl. Kap. 3.2). Dennoch erscheint angesichts der enormen Größe des Retentionsraumverlustes die Vermutung einer deutlichen Scheitelbeeinflussung sehr plausibel. Insofern war es im vorliegenden Projekt begründet, die vorgenommenen Eindeichungen als weitere Quelle von möglichen Inhomogenitäten in den HQ-Reihen einzustufen und genauer zu untersuchen.

Nach heutigem Stand des Wissens müssten im Zuge der Homogenisierung der inhomogenen HQ-Reihen folglich auch Nachweisberechnungen mittels mathematischer Abflussmodelle durchgeführt werden, die die seit 1890 bis 2013 in verschiedenen Phasen zu verzeichnenden Verluste von Überschwemmungsgebieten (ÜSG) entsprechend der Talsperren (vgl. Kap. 7 und 10) sukzessive in die Modellzustände integrieren. Hierfür einsetzbare (und kalibrierte) Abflussmodelle für verschiedene historische Zustände (Flächengrößen) der ÜSG, die in ihrer Qualität mit dem aktuellen Elbemodell (Kap. 7.2.3) oder dem verwendeten historischen Moldaumodell (Kap. 7.1.1) vergleichbar wären, existieren momentan jedoch nicht. Somit können Effekte aus den erwähnten Eindeichungen nicht unmittelbar in den homogenisierten HQ-Reihen abgebildet und in die nachfolgende Extremwertstatistik mit einbezogen werden.

Mit den zuständigen Gremien der FGG Elbe wurde angesichts dieser Ausgangssituation vereinbart, mögliche Wirkungen des Verlusts von Überschwemmungsgebieten seit 1890 auf Elbehochwasser durch den Einsatz des aktuellen hydraulischen Abflussmodells der BfG (Kap. 7.2.3) anhand ausgewählter Elbehochwasser abzuschätzen und somit qualitativ in die Gesamtbetrachtung einzubringen. Für eine Wirkungsabschätzung sind Informationen bzw. Daten zur Art der Baumaßnahme (die den ÜSG-Verlust verursacht), zu Zeitpunkt des Verlusts sowie zu Lage, Größe und Speichervolumen der ehemaligen Retentionsräume erforder-

> lich. Aufgrund wechselnder Zuständigkeiten und Verfügbarkeit in Archiven stellte sich die Datenbeschaffung als sehr schwierig heraus. Zusammen mit den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Elbeanliegerländer wurden im Rahmen eines mit Ressortforschungsmitteln des Bundes finanzierten Projektes in der BfG umfangreiche Recherchen, Datenerhebungen und Auswertungen vorgenommen, um Baumaßnahmen von Deichen und Absperrbauwerken seit 1890 festzustellen und zu dokumentieren, die eingedeichten ÜSG zu verorten sowie die Flächen und Speichervolumina mit Geographischen Informationssystemen (GIS) auf Basis heutiger Geländedaten zu erfassen. Zur Plausibilisierung der mit GIS erfassten Flächen für verloren gegangene ÜSG wurden Vergleiche mit publizierten Werten und mit den von den Bundesländern bereitgestellten Unterlagen vorgenommen.

9.2.1 Digitalisierung und Vektorisierung der Karten des Elbstromwerks

Um den in vielerlei Hinsicht von der Gegenwart abweichenden Zustand 1890 zu definieren, ist es notwendig, den Gewässerlauf, Deichlinien und eingedeichte sowie natürliche (potenzielle) Überschwemmungsgebiete aus geeigneten historischen Geodaten zu erfassen. Hierfür empfahl sich die Stromtalkarte im Maßstab 1:100.000 des in der BfG im Original vorliegenden "Elbstromwerkes" (ELBSTROMBAUVERWALTUNG 1898) aufgrund ihres Alters und ihrer Abdeckung der gesamten deutschen Binnenelbe.

Die 1898 herausgegebene mehrbändige Monographie "Der Elbstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse" (ELBSTROMBAUVERWALTUNG 1898) wird auch als "Elbstromwerk" bezeichnet. Das mehrbändige Werk bietet eine Zusammenfassung der seit den 1870ern stark angewachsenen gewässerkundlichen, wasserbaulichen und wasserwirtschaftlichen Informationen zum Fluss. Es steht in einer Reihe weiterer von 1896 bis 1901 herausgegebener Stromwerke zu großen Flüssen, die unter der Koordination des sogenannten Preußischen Wasserausschusses (Gründung 1892) "zur Untersuchung der Wasserstandsverhältnisse in den der Überschwemmungsgefahr besonders ausgesetzten Flussgebieten" erarbeitet wurden (WIKIPEDIA-AUTOREN 2014, ROMMEL 2014). Neben der Topographie zeigt der Kartenband des Elbstromwerk folgende hydrographischen Inhalte:

- Überschwemmungsgebiet, natürlich (potenziell) und eingeschränkt (aktuell)
- **Flusslauf** (Gewässerachse) bei Mittelwasser mit Stationierung (alte Elbe-km) und Buhnen, Deckwerken, Schleusen, Wehren und Fähren; dazu Altwasser und Zuflüsse
- **Deiche** mit nummerierten Sielen, unterschieden nach hochwasserfreien Winterdeichen und Sommerdeichen
- Hauptpegel, Hochwasser- und Hilfspegel

Diese hydrologisch wertvollen Linien bzw. Flächen wurden im Auftrag der BfG aus den digitalisierten Elbstromkarten vektorisiert und georeferenziert (ROMMEL 2014). Es ist zu beachten, dass als "aktuelles Überschwemmungsgebiet 1890" das gemäß der Flächeneinfärbung der Stromtalkarte 1898 im damaligen Zustand winterdeich-beschränkte ÜSG bezeichnet wird. Der Bezug auf 1890 ist hier vereinfachend so gewählt worden. Tatsächlich ist der im Elbstromwerk verwendete Ereignisbezug unklar und setzt sich vermutlich aus den regional (verwaltungstechnisch) unterschiedlich definierten Überschwemmungsgebietsausweisungen und tatsächlichen Ereignisausmaßen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zusammen. Es handelt sich somit nicht um das tatsächliche ÜSG des besonders im Oberlauf der Elbe verheerenden Hochwassers 1890 und auch nicht um das ÜSG bei einer stationären Wasserspiegellage für einen HQ₁₀₀-Abfluss. Das verwendete ÜSG wurde herangezogen, um im Vergleich mit dem ÜSG der aktuellen Hochwassergefahrenkarten an der Elbe (Zustand 2013) für ein sogenanntes häufiges Ereignis (HQ_{10/20}) Gebiete zu identifizieren, die seit 1890 eingedeicht oder wieder zurückgewonnen wurden. Die Wirkung der ermittelten Flächen sollten mittels hydraulischer Modelle hinsichtlich ihrer Wirkung auf Elbehochwasser untersucht werden (Kap. 9.2.2).



Abbildung 9-2: Elbstromkarte im Bereich der Havelmündung (ELBSTROMBAUVERWALTUNG 1898)

Abbildung 9-2 zeigt vor dem Hintergrund eines aktuellen Luftbildes (BKG 2017) ein im Bereich der Havelmündung (Elbe-km 338,2 - 438) platziertes Kartenblatt der digitalisierten Elbstromkarte. Man erkennt die Verläufe von Elbe und Havel (rote Linien), das aktuelle (bedeichte) und das natürliche (beschränkte) ÜSG zum Zustand 1890. Aufgrund des Zuschnitts der Elbstromkarten und der Kartengröße (Höhe ca. 20 cm) sowie des Maßstabs 1:100.000 ist die maximale Ausdehnung der dargestellten Überschwemmungsgebiete auf ca. 10 km rechts und links des Gewässerverlaufs begrenzt. Ausgerichtet sind diese Karten, wie anhand der in Abbildung 9-2 dargestellten Karte zu sehen ist, zuvorderst auf den Elbeverlauf. So beschränkt die Kartenblattgröße des Elbstromwerks die Abbildung des ÜSG insbesondere in den Nebenflüssen, sodass hier das aktuelle ÜSG und das natürliche ÜSG der Elbe im Rückstau von

Zuflüssen nicht immer in den digitalisierten Karten vollständig erfasst werden konnte (siehe Pfeil in der Karte). Für die Hochwasserhydrologie der Elbe ist die im Projekt digitalisierte Elbstromkarte trotzdem von hohem Wert, wie das nachfolgende Beispiel zeigt.



Abbildung 9-3: Überschwemmungssituation im Bereich Lenzen in den Zuständen 1890 (Elbstromwerk) und 2013 (Hochwassergefahrenkarten, $HQ_{10/20}$)

In Abbildung 9-3 wird veranschaulicht, wie sich im Bereich der Deichrückverlegung Lenzen (zwischen Elbe-km 474,6 und 486) die Hochwassersituation im Zustand 1890 und im Zustand 2013 darstellte. Hier wurden in den vergangenen Jahrzehnten durch verschiedene Hochwasserschutzmaßnahmen bedeutsame Änderungen hervorgerufen. Die beidseitigen elbenahen Deiche schnürten im Jahre 1890 die Elbe und ihr Vorland in einem engen Schlauch ein. Durch den Rückstau in die Löcknitzniederung reichte das ÜSG der Elbe jedoch am rechten Ufer südlich und westlich der Ortschaft Lenzen landseitig unmittelbar an den damaligen Deich heran. Da die Löcknitzniederung durch die Errichtung eines Sperrwerks 1973 abgeriegelt wurde, entfällt für Elbehochwasser seither weitgehend dieses ÜSG. Das ÜSG des Zustands 2013 ergibt sich hier, indem ehemalige, in der Löcknitzniederung gelegene Anteile des Überschwemmungsgebietes durch die im Jahre 2009 erfolgte Deichrückverlegung Lenzen dem ÜSG der Elbe wieder zurückgegeben wurden. Deutlich kommt in Abbildung 9-3 zum Vorschein, dass in der Flächenbilanz das aktuelle Überschwemmungsgebietet wurde.

Zur Plausibilisierung der digitalisierten und durch die BfG ermittelten Gesamtflächen können die im Tabellenband des Elbstromwerks zusätzlich veröffentlichten Flächenangaben herange-

zogen werden. Für das eingedeichte ÜSG des Zustands 1890 ergibt sich aus den digitalisierten Karten eine Fläche von ~ 990 km², während im Tabellenband des Elbstromwerks eine deutlich größere Fläche von ~ 1.190 km² angegeben ist. Ergänzt man die im Elbstromwerk vermeintlich abgeschnittenen Flächen (bspw. an Nebenflüssen wie der Havel) durch die Flächen aus den vorliegenden Hochwassergefahrenkarten für HQ_{10/20}, dann erhält man für die eingedeichten Flächen insgesamt einen Wert von ~ 1.130 km², der somit nahezu identisch mit den Angaben des Tabellenbands (s. o.) ist. Dies wird als ein Indiz für die hohe Qualität der Karten des Elbstromwerks angesehen. Weitergehende Auswertungen, die die Angaben des Tabellenbands und die digitalisierten Flächengrößen des Kartenwerks streckenabschnittsbezogen vergleichen, bestätigen diese Erkenntnis für die meisten nah an der Elbe gelegene ÜSG (Abweichungen i. d. R. < 10%). Die Vergleiche können jedoch auch gravierende Abweichungen zwischen den verschiedenen Quellen in der Größenordnung > 25% zeigen, u. a. dann, wenn im Bereich der im Kartenwerk abgeschnittenen Nebenflüsse (z. B. Havel, Jeetzel) die Grenzen der im Tabellenband angegebenen Elbabschnitte nicht klar verifizierbar sind.

Nach Digitalisierung und Georeferenzierung der Karten, Vektorisierung der Karteninhalte und deren anschließenden Plausibilisierung (s. o.) wurden die im Elbstromwerk für den Zustand 1890 dargestellten ÜSG mit dem ÜSG der aktuell vorliegenden Hochwassergefahrenkarten der Bundesländern für ein häufiges Ereignis ("~ topographischer Zustand 2013") verschnitten, um die Verluste bzw. Gewinne an Überschwemmungsgebieten seit 1890 lageund flächenmäßig zu erfassen. In Abbildung 9-4 sind die verlorenen/gewonnenen Gebiete entsprechend ihrer Größe und ihrer Lage entlang des Elbelaufs dargestellt. ÜSG-Verluste sind nicht nur infolge von Deichbau entlang der Elbe, sondern vor allem auch aufgrund der Abriegelung von Nebenflüssen (Havel, Karthane, Löcknitz, Aland, Jeetzel, Sude) an der unteren Mittelelbe zu verzeichnen. Zurück gewonnene Flächen aufgrund von Deichrückverlegungen in jüngerer Zeit (Dessau-Roßlau, Lödderitzer Forst und Lenzen) sind ebenfalls dokumentiert. Tabelle 9-1 enthält für die verschiedenen Maßnahmen weitere Informationen zu Zeitpunkt, Ort und Ursache des Verlusts. Eine belastbare Angabe der Flächengröße ist nicht für alle Flächen möglich. Diese Flächen sind in Tabelle 9-1 und Abbildung 9-4 gesondert gekennzeichnet. Gründe sind vor allem große nicht erfasste ÜSG-Bereiche (Kartenblattgrenze, s. o.) und fehlende Detailkenntnisse darüber, wie weit der Rückstau der Elbe in die Nebengewässer für den Zustand 1890 jeweils reichen konnte (kann). Dies betrifft beispielsweise die Jeetzel, für die zwar historische Karten des festgestellten Überschwemmungsgebiets aus dem Jahr 1912 vorliegen, auf deren Grundlage allerdings die Abgrenzung des Elberückstaueinflusses nicht zweifelsfrei möglich ist. Eine ergänzende Recherche von historischem Kartenmaterial und Daten (für alle relevanten Nebenflüsse) könnte hier nochmals eine Verbesserung der Detailkenntnisse (vgl. Kap. 13) erbringen, war jedoch im vorliegenden Vorhaben aufwandsbedingt nicht umsetzbar. Es wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass besonders in den Nebengewässern oftmals Eindeichungen zum potentiellen Verlust an ÜSG bei kleinen Hochwasserereignissen führen, die bei großen Ereignissen (> HQ₅₀) jedoch weiterhin zu Ver-

> fügung stehen (Teilschutz-/Sommerdeiche). Beispielhaft hierfür steht der in Tabelle 9-1 aufgeführte ÜSG-Verlust durch den Bau des linksseitigen Hauptdeichs der Ohre - er wird bei HQ_{100} überströmt, wodurch das Hinterland als ÜSG wieder zur Verfügung steht.

> **Tabelle 9-1:** Fläche, Zeitraum und Lage von verlorenen und gewonnenen Überschwemmungsflächen an der Elbe (Vergleich mit häufigem Ereignis $HQ_{10/20}$ der Hochwassergefahrenkarten); die angegebene Nummerierung dient der Zuordnung der Flächen in Abb. 9-4

ÜSG	F 11. a 1		USG	USG	1	Bundes-	Davisha	Art das Daumaßnahms
lfd.Nr.	Elbe-km	Uter	rhol	gewonnen	Lage	land	Baujanr	Art der Baumasnanme
	100 120	r 1	[naj	[naj	potortialla ÜSC			
2	132	1, 1 r	112		bei Brottewitz	BB	bis 1950	Straßenhau
3	160-163	r	608		bei Döblen	SN	1895-1900	Polder Dautzschen
6	195	i.	20		bei Bleddin	ST	2004-06	Sanierung Hochwasserschutzdeich Bleddin-Wartenburg
_					Mündung Schwarze Elster	07		
	-	r	206		bei Gorsdorf- Hemsendorf	SI	ca. 1960	Neubau Deich Hemsendorf rechtsseitig
8	200-205	r	76		Elbeufer	ST	2014-16	Neubau HWS Elster-Listerfehrda; Teilabschnitt Elster (vorher keine Hochwasserschutzanlagen)
9	206	r	128		bei Gallin	ST	1970-74	Deichbau Iserbegka-Gallin
10	215	r	16		hei Wittenhera	ST	2000	Bau Ortsumgehungsstraße
10	215		10		ber Wittenberg	51	2000	Wittenberg
11	220	r	45		bei Wittenberg	ST	1988	Bau Klaranlagendeich Wittenberg-Piesteritz
12	222-235	I	1151		bei Seegrehna, Rehsen, Schönitz	ST	Dekaden bis ca. 1940	Deichneubauten zur Gewinnung landwirtsch. Flachen von Seegrehna bis Schönitz
13	245-255	Т	1923		bei Wörlitz-Vockerode-Mildensee	ST	über mehrere Dekaden bis ca. 1940	Deichneubauten in Verbindung mit Neubau Kraftwerk Vockerode sowie Neubau Autobahn A 9
14	255	r		138	DRV bei Rosslau	ST	2007	Deichrückverlegung
15	260	1	62		Mündung Mulde (entlang der Elbe)	ST		
16	-	I	199		Mündung Mulde bei Sollnitz	ST	nicht bekannt, wahr-	Deichneubau Niesau (linksseitig) und Sollnitz (rechtsseitig)
							Schemich Vor 1314	DRV Lödderitzer Forst
18	280-285	1		580	bei Lödderitz	ST	2017	Durchstich noch nicht erfolat!
19*	-	Т	>200		Saale Mündung bis Trabitz Grizehne	ST	1930-1940	Saaledeiche unterhalb Calbe
20	300	r		74	bei Dornburg	ST		Dornburger Wiesen
21	320-345	r, I	1055		Stadt Magdeburg	ST	1928/1932 1908/1911	Magdeburger Hafen Kanalhafen 1928/32 und Industriehafen 1908/11 östlich der Elbe der Herrenkrugdeich zum Schutz des Parkhotels
22		-	501		Nobonfluce Obro bio Wolmirstodt	ет	00, 1000	und der Sportanlagen Reu der Obrehaustdeiche
22	-	-	291		Neberlindss Onlie bis Wolfninstedt	31	Cd. 1900	Deichverlegung im Zuge des Baus
23	390	r	78		Elbeufer bei Fischbeck	ST	1933	der Elbebrücke Tangermünde
25*	-	r	>960		westlich von Rehberg	ST	1970-75	Linker Havelpolderdeich Warnau-Rehberg-Molkenberg (EZG Havel)
26*	-	r	>2500		Havelmündung	ST	1957	Wehr Neuwerben
27	435	r		39	Elbeufer	BB	1954	Gnevsdorfer Vorfluter
28	-	r	3573		Mündung Karthane	вв	1980 1981	SW Karthane
20	165	-	012		Wahraphara bia Cropza NI	ет	1090 bio 2004	Komplexmelloration
29	405 -	-	342		USG NE Aland	ST	bis 2004	diverse Baumaisnanmen, u.a. Grenzsicherung
31	476		042	15	Elbeufer	NI	1980-1996	Elbedeich
							HW 1981	reduzierte Fläche bereits durch Erkenntnisse aus HW 1981
34	-	I	325		Nebenfluss Seege	NI	28.11.1986 ab 80er 2005-2015	(Luftbildaufnahmen) Erkennthisse in ÜSG von 1986 eingeflossen Verwallungen Deichbau von 2005 his beute
35	-	Т	594		Nebenfluss Seege	ST	1970-2017	Bau Flutmuldendeiche, aktuell Bömenzierner Deich
36	-	1		249	Nebenfluss Seege	NI	1968-1981	Seege Deich
37*	-	r	> 3000		ÜSG Löcknitz	BB	1973	Wehr Wehningen
37a	477-484	r		420	DRV Lenzen	BB	2009	DRV Lenzen
38-40	505	r	283		Elbedeich bei Dömitz	MV	1972-1973	100 Tage Elbedeiche, Verlegung der Löcknitzmündung und Bau Wehr Wehningen
44*	-	I	>3000		Jeetzelmündung	NI	1952-1965 80/90er Jahre 01.08.1986 2005-2008	Jeetzelausbau und Deichbau Deichbau Berücksichtigung der Reduzierung bei ÜSG von 1986 Mündungsbauwerk bei Hitzacker nur noch Jeetzelwasser/rein Elhewasser
49	-	r	257		Alte Krainke	ΜV	1982	Sudeabschlusswehr
51	555	r		55	Gothmann bis Landesgrenze NI	MV	2009	Deichrückverlegung Mahnkenwerder
52	555	r	161		Sudeniederung bei Mankenwerder	MV	1982	Sudeabschlusswehr
53*]]	>3000		Sude Mündung auch an den	NL MV	1982	Sudeabschlusswehr
	500				Sudenebenflüsse Rögnitz und Krainke		1002	Delite Delevelore
54	560	r	505		Del Bolzenburg	MV	1984	Polaer Bolzenburg
55*	563	r	>1700		Mühlenbach	SH	ca 1964/65	Bau Elbdeich
56	586		162		Wehr Geesthacht	SH	1960	Bau Staustufe Geesthacht inklusiv Elbe-Leitdamm unterhalb
	1. A. A.							

ÜSG gewornen
 ÜSG im Elbstromwerk nicht vollständig dargestellt (abgeschnitten)



Bei den mit * markierten Flächen ist die genaue Größe nicht bekannt

Abbildung 9-4: Durch Baumaßnahmen bedingte Verluste und Rückgewinnungen von Überschwemmungsgebieten an der Elbe seit 1890 (Vergleich mit häufigem Ereignis HQ_{10/20} der Hochwassergefahrenkarten)

Obwohl durch die Digitalisierung nun umfassende Geobasisdaten (historischer Gewässerverlauf, Überschwemmungsgebiete, Deichlinien, etc.) für den historischen Zustand 1890 zur Verfügung stehen, fehlen noch essentielle Kenntnisse, wie bspw. großräumige Erkenntnisse zu den ehemaligen Geländehöhen der Elbe und ihres Vorlandes (siehe auch Kap. 9.1), um ein Abflussmodell für den historischen Zustand "Elbe 1890" aufbauen zu können. Nur dann wäre es im Projekt möglich gewesen, die Wirkung der verlorenen Überschwemmungsgebiete auf den Hochwasserablauf nach Stand der Technik belastbar zu modellieren. Die nun im folgenden Kapitel vorgestellten, hydraulischen Modellierungen auf Basis des aktuellen SOBEK-Modells der Elbe können deshalb nur eine Abschätzung möglicher Größenordnungen der Wirkung von Eindeichungen auf den Hochwasserablauf in der Elbe geben und Hinweise liefern, in wie weit existierende hydraulische Modelle dazu geeignet sind, die aufgeworfenen Fragestellungen zum Thema zu beantworten.

9.2.2 Modellgestützte Wirkungsabschätzungen zum Verlust von Überschwemmungsgebieten seit 1890 auf Elbehochwasser

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Auswertungen der Elbstromkarten bestätigen den in SIMON (1996) angegebenen ÜSG-Verlust lediglich in seiner groben Größenordnung (SIMON (1996): ~ 700 km²; vorliegende Studie: >> 300 km²). Ursachen hierfür können - wie zuvor beschrieben - u.a. in der fehlenden Kartenabdeckung der Nebenflüsse, ungenauen Kenntnissen zu dortigen Rückstaueffekten und tatsächlichen Deichhöhen im Zustand 1890 an der Elbe gefunden werden und lassen sich auf Basis der derzeitigen Datengrundlage nicht abschließend klären. Bestätigt wird jedoch, dass die bedeutendsten ÜSG-Verluste durch die vorgenommenen Abriegelungen der Nebenflüsse (Sperrbauwerke an den Mündungen) verursacht (Abb. 9-4) wurden. Vormals floss Elbewasser bei hohen Wasserständen in die Nebenflüsse hinein, so dass deren ÜSG als natürliche, teilweise weit flussaufwärts reichende Rückstauräume für die Elbe dienten. Es ist davon auszugehen, dass die Hochwasserwellen der Elbe unterhalb der abgeriegelten Mündungen heute beschleunigt ablaufen, da diese seitlichen Speicherräume nicht mehr von der Elbe gefüllt werden. Infolge dessen können auch die Hochwasserscheitel der Elbe durch den Wegfall dieser Rückhalteräume betroffen sein. Im Gegensatz hierzu verursachen unmittelbar an der Elbe gelegene ÜSG vergleichsweise geringere Auswirkungen auf Hochwasser der Elbe, da sie früher bereits mehr oder weniger aktiv am Abflussgeschehen der Elbe teilnahmen und nur bedingt als Speicherräume wirkten. In diesen Fällen ist durch Eindeichungen ggf. von lokalen Wasserstanderhöhungen auszugehen, aber nur in geringerem Maße von Auswirkungen auf den Wellenablauf nach unterstrom.

Um ein besseres Systemverständnis zwischen Hochwasserablauf und Hochwasserbeeinflussung durch großflächige Eindeichungen an Elbe und Havel zu erhalten, wurden vereinbarungsgemäß mit dem vorliegenden SOBEK-Modell der Elbe für den heutigen Zustand Szenarienberechnungen zur Wirkungsabschätzung von Eindeichungen auf Hochwasser vorgenommen. Es wurde...

- … f
 ür das Hochwasser vom April 2006 exemplarisch eine maximal m
 ögliche Wirkung der an der Elbe liegenden (verlorenen)
 ÜSG auf den Hochwasserscheitel modellbasiert abgesch
 ätzt (Szenario "Elbevorland 1890") und
- ... für alle 30 in der Betrachtung des Projekts liegenden Hochwasser mögliche scheitelreduzierende bzw. erhöhende Wirkungen aufgrund der Abriegelung der Havelniederung berechnet (**Szenario "Havel 1936"**).

Szenarienberechnungen für den Zustand "Havel 1936"

Im Hochwasserfall bildete die Havel schon immer ein natürliches Rückstau- und Entlastungsgebiet für Hochwasser an der Elbe, da in dieser bei maximalen Scheitelwasserständen der Wasserspiegel um 4 m höher als in der Havel liegt (IKSE 2005). Im Becken der Havelniederung wurden somit jährlich bis zu 38.000 ha landwirtschaftliche Fläche zwischen Rathenow und der Mündung überflutet und somit der ansässigen Landwirtschaft schwere

Schäden zugeführt (WSA BRANDENBURG 2001). Da sich die Hochwasserscheitel der Havel meist erst nach dem Scheiteldurchgang der Elbe einstellen, war die Landwirtschaft nicht nur großflächig, sondern häufig auch wochen- und monatelang durch die Überflutungen beeinträchtigt.

Gegenmaßnahmen zur Entlastung der Bevölkerung wurden bereits ab den Jahren 1771/1772 getroffen, als der vorhandene Deich der Elbe ab Sandau (Elbe-km 418) verlängert und somit die Havelmündung um 3 km bis zum Elbe-km 431,4 verlagert wurde. Obwohl dies bereits eine große Verbesserung bedeutete - die Rückstauhöhe der Elbe in die Havel wurde um 2,2 m abgesenkt -, kam es (bspw. während des Katastrophenhochwassers vom Juni 1926) immer noch zu Rückstaueffekten, die stromaufwärts bis Rathenow reichten (IKSE 2005). Aus diesem Grund wurde zwischen 1933 und 1936 die Wehrgruppe "Quitzöbel" errichtet und die Havelmündung mit der Fertigstellung des Gnevsdorfer Vorfluters im Jahr 1954 nochmals um 6,6 km weiter stromabwärts (Elbe-km 438,0) verlegt. Die in Abbildung 9-5 verzeichneten Polder an der Havel befinden sich im ehemaligen ÜSG und können gemäß "Staatsvertrag über die Flutung der Havelpolder und Einrichtung einer gemeinsamen Schiedsstelle" für den Fall eines gefahrbringenden Hochwassers in der Elbe (über das Wehr Neuwerben) mit Elbewasser geflutet werden.



Abbildung 9-5: Heutige Stauanlagen im Bereich der Havelmündungsstrecke und Havelpolder unterhalb von Rathenow (LUGV Brandenburg)

> Um in einem fiktiven hydraulischen Modellzustand "Havel 1936" die von der Havel abgetrennten und nur bei "extremem" Hochwasser über das Wehr Neuwerben gefluteten (BFG 2011) Flächen der Havelniederung für eine "natürliche" Überflutung von der Elbe verfügbar zu machen, wurde für die Modellläufe im aktuellen Elbemodell das (normalerweise geschlossene) Wehr Neuwerben dauerhaft geöffnet und die (normalerweise geöffneten) Wehre Quitzöbel (Altarm- und Durchstichwehr), die in den Gnevsdorfer Vorfluter entwässern, dauerhaft geschlossen. Auch die Havelpolder, die überlicherweise nur im oben genannten Ereignisfall geöffnet werden, sind im Modell dauerhaft mit Wasser beschickbar und können somit schon bei kleinen Hochwassern geflutet werden. Als Folge dieses Modellaufbaus wird die Havel wieder mittels des natürlichen Wasserspiegelgefälles Elbe/Havel geflutet. Der Wasserstandunterschied ist dabei deutlich größer als bei Rückstau über den Gnevsdorfer Vorfluter. So steht schon bei kleinen Hochwassern potentiell das gesamte Havelpoldervolumen als ungesteuerter Retentionsraum zur Verfügung.

> Zur Wirkungsabschätzung wurden auf Grundlage der Ergebnisse aller 30 modellierten Elbehochwasser Scheitelabflussdifferenzen zwischen dem berechneten Zustand ohne Havelpolderflutung "*mS-mLi-mOr-mNe(MESS)*" (vgl. Tab. 10-1) und einem (wie zuvor beschriebenen) fiktiven Zustand mit "natürlicher" Havelflutung (s. o.) berechnet. Diese sind in Abbildung 9-6 für den Pegel Wittenberge (unterhalb der Havelmündung) dargestellt.



Abbildung 9-6: Ergebnisse der modellbasierten Wirkungsabschätzung für 30 ausgewählte Hochwasser zwischen 1970 und 2013 bei einer fiktiven "natürlichen" Flutung der Havelniederung am Pegel Wittenberge

Durch die fiktive Verfügbarmachung der berücksichtigten Überschwemmungsgebiete in der Havelniederung im hydraulischen Modell "Havel 1936" ergeben sich im Vergleich zur heutigen Situation schon bei kleinen Hochwassern Scheitelreduktionen am Pegel Wittenberge. Bei den großen Ereignissen der Jahre 2002 und 2013, die - ohne Deichbrüche modelliert - bei Abflüssen über 4.545 m³/s (HQ₁₀₀) liegen, erreichen die "natürlichen" Scheitelreduktionen Größenordnungen, wie sie bei der tatsächlichen Flutung der Havelpolder während der beiden genannten Ereignisse erzielt wurden. Die ereignisabhängig zwischen -100 m³/s und -600 m³/s liegenden Scheitelreduktionen belegen den großen möglichen Einfluss der Havelniederung auf den Hochwasserwellenablauf an der unteren Mittelelbe.

Szenarienberechnungen "Elbevorland 1890"

Ähnlich wie die Havelniederung wurden auch die direkt an der Elbe gelegenen (heute verlorenen) ÜSG aus Tab. 9-1 in einer modellbasierten Szenarienberechnung als Retentionsraum für Hochwasser wieder verfügbar gemacht. Analog zu den Havelpoldern erfolgte die Inanspruchnahme dieser Speicherräume modelltechnisch im Sinne von steuerbaren Poldern, die ab Überschreiten der mittleren Ausuferungshöhe im Vorland beaufschlagt werden können. Während durch die Abbildung von eingedeichten ÜSG als fiktive Polder im Modell die Situation an der Havel den natürlichen historischen Verhältnissen im Ablauf von Elbehochwassern weitgehend entsprochen wird (Abfluss wird dem System der Elbe temporär entzogen), ist der gewählte Ansatz für die direkt am Elbelauf gelegenen ÜSG-Flächen mit deutlich größeren Unsicherheit zu versehen, da diese Flächen häufig durchströmt (abflusswirksam) waren und somit aus modelltechnischer Sicht keinen klassischen abgesperrten "Speicherraum" darstellen. Die Wirkung der so modellierten ÜSG auf Hochwasserscheitel wird in der vorliegenden Wirkungsabschätzung deshalb vermutlich deutlich überschätzt. Eine Abbildung dieser Flächen im Modell als Polder ist daher nur zum Zwecke einer ersten sehr groben Abschätzung einer theoretisch maximalen scheitelreduzierenden Wirkung geeignet.

Abbildung 9-7 zeigt das im Elbstromwerk dargestellte bedeichte ÜSG im Zustand 1890 in der Mäanderstrecke (Elbe-km 222-235) unterhalb von Lutherstadt Wittenberg. Deutlich zu erkennen sind am linken Ufer eine elbnahe (nicht vollständig geschlossene) sowie eine etwas weiter im Hinterland befindliche Deichlinie, die das ursprüngliche ÜSG im Zustand 1890 begrenzt (Liniensignatur). Das heutige Deichsystem wird durch eine Punktsignatur skizziert und begründet das deutlich verkleinerte heutige ÜSG. Bereits um 1940 existierte dort die heutige Deichlinie und sorgte für den Schutz der dahinterliegenden landwirtschaftlichen Flächen vor Hochwasser. Das entfallene Gebiet umschließt eine Fläche mit einer Größe von ca. 11,5 km² (vgl. Tab. 9-1, Nr. 12). Nicht geklärt werden konnte im Rahmen der Datendigitalisierung der historische Ausbauzustand der Deichlinien, der für die tatsächliche Überschwemmung der Flächen bei Hochwassern unterschiedlicher Größe von Bedeutung ist und somit eine weitere Unsicherheit in der vorgenommenen Wirkungsabschätzung darstellt.



Abbildung 9-7: Bedeichte Überschwemmungsgebiete im Zustand 1890 (Elbstromwerk) und heute (Hochwassergefahrenkarten, $HQ_{10/20}$) an der Elbe unterhalb von Lutherstadt Wittenberg (Elbe-km 222-235) (ELBSTROMBAUVERWALTUNG 1898)

Für die Szenarienberechnung des Modellzustands "Elbevorland 1890" wurden mittels GIS-Verschneidung auf Basis heutiger Geländedaten (DGM-W 2007, siehe BFG 2008) und für 10 stationäre Wasserspiegellagen (FLYS, BFG 2009) für alle identifizierten Differenzflächen (verlorene ÜSG) Speicherkurven in Form von Wasserstand(W)-Volumen(Vol)-Beziehungen ermittelt. Mit ihrer Hilfe konnte anschließend die Füllung dieser Räume im Modell als Polder simuliert werden. Abbildung 9-8 zeigt exemplarisch die ermittelte W-Vol-Beziehung für das in Abbildung 9-7 als "verloren" gekennzeichnete Gebiet zwischen Seegrehna und Rehsen. Bei einem Abfluss von ca. 1.000 m³/s in der Elbe (< MHQ) und einem Wasserstand von ~ 64 m+NHN setzt in diesem Modellszenario die Füllung des Polders, d. h. die Überschwemmung dieses Gebietes ein. Bei überstauten Höhen von 2-3 m wurde (bei einem Abfluss von HQ₂₀₀=4.800 m³/s am Pegel Lutherstadt Wittenberg) ein maximal in dieser Fläche zur Verfügung stehendes Volumen von ~ 37 Mio. m³ ermittelt.



Abbildung 9-8: Geometrisch abgeleitete Wasserstand-Volumen-Beziehung für das eingedeichte Gebiet an der Elbe bei Seegrehna und Rehsen (Elbe-km 222-235)

In den Wellenablaufberechnungen, die exemplarisch für das Hochwasser vom April 2006 durchgeführt wurden, sind die seit 1890 eingedeichten, unmittelbar am Hauptlauf der Elbe gelegenen Überschwemmungsgebiete (vgl. Tab. 9-1) mit einer Gesamtfläche von ~ 8.000 ha (80 km²) berücksichtigt, um deren maximal möglichen Wirkungen auf Elbehochwasser abzuschätzen. Für das Hochwasser vom April 2006 sind die Ergebnisse dieses Szenarios in Abbildung 9-9 für den Pegel Wittenberge vergleichend zu den weiteren im Bericht untersuchten Effekten (Talsperrenwirkung, "natürliche" Flutung der Havelniederung) dargestellt.

Mit dem in Kapitel 7.2.3 beschriebenen SOBEK-Modell der Elbe lässt sich die gemessene Abflussganglinie am Pegel Wittenberge sehr gut reproduzieren, wie aus dem Vergleich zwischen den Messwerten (schwarze Ganglinie) und den Modellergebnissen (blaue Ganglinie) hervorgeht. Alle in den drei Szenarienberechnungen (Talsperren, "Havel 1936", "Elbevorland 1890") ermittelten Scheitelabflüsse werden in Bezug zum Modellergebnis für den Ist-Zustand ausgewertet. Beim Aprilhochwasser 2006 profitierte die ganze deutsche Binnenelbe im besonderen Maße von Rückhaltungen in tschechischen und thüringischen Talsperren. Das eingesetzte Rückhaltevolumen von > 500 Mio. m³ (Abb. 1-1) bewirkte am Pegel Wittenberge eine Scheitelreduktion von etwa 700-800 m3/s (vgl. Anlage 3.3 bzw. BFG 2012). Ohne diese Maßnahmen hätte sich in Wittenberge ein um dieses Maß erhöhter Scheitel eingestellt (rote Ganglinie). Eine gegenläufige, den Scheitelabfluss senkende Wirkung würde für das Hochwasser 2006 von den seit 1890 eingedeichten, reaktivierten ÜSG an Havel und Elbe ausgehen. Ergebnisse der Wirkungsabschätzungen zeigen, dass im Fall wieder flutbarer ÜSG an der Havel (Szenario "Havel 1936"; hellgrüne Ganglinie) mit einem genutzten ungesteuerten Rückhaltevolumen von 300 Mio. m³ sich eine Scheitelreduktion von ca. 300 m³/s einstellen könnte. Auch die nach 1890 eingedeichten ÜSG am Hauptlauf der Elbe (Szenario "Elbevor-

> land 1890"; dunkelgrüne Ganglinie) hätten bei ihrer Reaktivierung in der Summe ein Volumen von etwa 150 Mio. m³ zwischengespeichert und den Scheitelabfluss in Wittenberge gegenüber dem heutigen um ca. 200 m³/s abgesenkt.



Abbildung 9-9: Exemplarische Berechnung der Talsperrenwirkung und Wirkungsabschätzung weiterer Szenarien für das Hochwasser im April 2006 am Pegel Wittenberge

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aufgrund der vorgenommenen hydraulischen Wirkungsabschätzungen für die Szenarien "Elbevorland 1890" und "Havel 1936" die in SIMON (1996) geäußerten Aussagen zu den bedeutenden Wirkungen entlang der mittleren Elbe durch Deichbau seit 1890 verlorengegangenen Überschwemmungsflächen auf den Hochwasserablauf in vielerlei Hinsicht bestätigt werden. Die gegenläufigen Effekte von im Oberlauf der Elbe geschaffenen Retentionsvolumina durch den Betrieb von großen Talsperren in Tschechien und Thüringen und im Unterlauf (v.a. im Bereich der Mittleren Elbe) verlorenen Rückhalteräumen konnten aufgezeigt werden; ebenso wurde bestätigt, dass der Verlust von Retentionsräumen Auswirkungen in einer Größenordnung von mehreren 100 m³/s auf die Scheitel großer Hochwasser hervorrufen kann.

Welcher der zuvor genannten Effekte unter welchen Randbedingungen dominiert, lässt sich derzeit jedoch mit den verfügbaren Modellinstrumentarien nicht verlässlich bestimmen, weshalb lediglich Wirkungsabschätzungen möglich waren. Auf Basis zu recherchierender, umfassender historischer Geobasisdaten (Gewässerverlauf, Querprofile, Deichlinien und deren Ausbauzustände, Überschwemmungsgebiete etc.) erscheint der Aufbau eines hydraulischen

Abflussmodells für die historische Elbe 1890 jedoch möglich und sinnvoll, um zu der in diesem Kapitel aufgeworfenen Fragestellung verlässlichere und detailliertere Aussagen treffen zu können. Ein erster Schritt wurde hierzu mit der Digitalisierung von Daten des Elbstromwerks gemacht. Einen weiteren wertvollen Beitrag könnten nun die aus dem Jahr 1902 stammenden analogen Unterlagen der Elbstrombauverwaltung Magdeburg liefern, die Bestandteil des Gutachtens "Generelles Regulierungsprojekt des Hochwasserbettes der Elbe" bildeten (ELBSTROMBAUVERWALTUNG 1902). Bundesanstalt für Gewässerkunde

> Bericht BfG-1938

10 Modellberechnungen und ihre Auswertung

Auf Grundlage der Kenntnisse, welche Talsperren in Tschechien (Moldau, Eger, Elbe) und Deutschland (Saale) für die Wirkungen auf den Hochwasserablauf an der Elbe von übergeordneter Bedeutung sind (vgl. Kap. 6) und ab wann die jeweiligen Talsperren für den Hochwasserrückhalt eingesetzt wurden, können Modellzustände definiert werden, die die Ermittlung von Transformationsfunktionen (vgl. Kap. 11) zwischen unterschiedlichen homogenen Teilzeiträumen, wie sie in Kapitel 6 dargestellt sind, ermöglichen. Effekte, die sich aus den Veränderungen in den Elbevorländern seit 1890 ergeben haben (v.a. durch Eindeichungen, Geländeerhöhung durch Sedimentation, Verbuschung) können aus den in Kapitel 9 genannten Gründen (Daten- und Modellverfügbarkeit, Relevanz) nicht quantitativ, d. h. nicht im selben Maße wie die Talsperren, in der Homogenisierung berücksichtigt werden. Somit ergeben sich für die modellgestützten Berechnungen die in Tabelle 10-1 vorgestellten Modellzustände. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Anzahl der Talsperren und werden hinsichtlich der Modellrandbedingungen sowie der implementierten Steuerung in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert. Der in der Tabelle angegebene Zeitraum beschreibt jeweils den Teilabschnitt der langen HQ-Reihe, der unter Zuhilfenahme der jeweiligen Modellergebnisse durch die Ableitung und Anwendung von zustandsbezogenen Transformationsfunktionen homogenisiert werden kann.

Lfd. Nr.	Name	Beschreibung	Modellrand- bedingungen*	Steuerung	relevant für Zeitraum
0	mS-mLi-mOr- mNe (MESS)	Ist-Zustand; Wirkung mit allen Talsperren in Tschechien (Lipno, Orlík, Nechranice) und mit Saale-Talsperren (Bleiloch, Hohenwarte)	gemessen	wie zum Zeitpunkt des HW	1968 - 2013
1	oS-oLi-oOr- oNe (1890)	Zustand 1890; ohne Wirkung von Talsperren in Tschechien und an der Saale	modelliert	ohne	1890 - 1941
2	mS-oLi-oOr- oNe	Zustand ohne Wirkung von Talsperren in Tschechien und mit Wirkung von Saale- Talsperren (Bleiloch, Hohenwarte)	modelliert	entsprechend der berücksichtigten Talsperren	1942 - 1959
3	mS-mLi-oOr- oNe	Zustand mit Wirkung der Talsperre Lipno (Moldau) und mit Wirkung der Saale- Talsperren (Bleiloch, Hohenwarte)	modelliert	entsprechend der berücksichtigten Talsperren	1960 - 1962
4	mS-mLi-mOr- oNe	Zustand mit Wirkung der Talsperren Lipno und Orlík (Moldau) und mit Wirkung der Saale- Talsperren (Bleiloch, Hohenwarte)	modelliert	entsprechend der berücksichtigten Talsperren	1963 – 1967
5	mS-mLi-mOr- mNe (MOD)	Ist-Zustand; Wirkung mit allen Talsperren in Tschechien (Lipno, Orlík, Nechranice) und mit Saale- Talsperren (Bleiloch, Hohenwarte)	modelliert	wie zum Zeitpunkt des jeweiligen Hochwassers	1968 - 2002/ (2013) (vgl. Kap.10.2)
6	mS-mLi-mOr- mNe (2013)	Zustand 2013; Wirkung mit allen Talsperren in Tschechien (Lipno, Orlík, Nechranice) und mit Saale-Talsperren (Bleiloch, Hohenwarte)	modelliert	wie im Jahr 2013	(1968)/2002 - 2013 (vgl. Kap. 10.2)

Tabelle 10-1: Übersicht über die unterschiedlichen Modellzustände und ihre Charakteristika (Name, Beschreibung, Randbedingungen, Steuerung, Zeitbezug)

(*gemeint sind hier die Randbedingungen zu den gekoppelten Modellen in Ústí n. L. und Halle-Trotha)

> Die vollständigen Berechnungsergebnisse der modellierten Hochwasserscheitel für alle sieben Modellszenarien werden in Anlage 2 ("Vergleich der simulierten mit gemessenen Scheitelwerten") und Anlage 3 ("Modellierte Scheitelabflüsse bei unterschiedlichen Talsperreneinflüssen") präsentiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass von den in Tabelle 5-1 aufgelisteten 30 Hochwasserereignissen zwischen 1970 und 2013 einige mehrgipfelige Ereignisse zum Zwecke der Analyse in Teilzeiträume unterteilt wurden. Es handelt sich für die Pegel an der deutschen Elbe hierbei um die Hochwasser vom März 1970, Juli 1971, März 1987 und März 2000; die Teilzeiträume werden jeweils mit dem Suffix "A", "B" und ggf. "C" in der Anlage und den in den folgenden Kapiteln beschriebenen Auswertungen gekennzeichnet.

10.1 Ist-Zustand / Vergleich von Modell- und Messdaten

Drei gekoppelte Modellsysteme bilden die Grundlage für die im Projekt durchgeführten großräumigen Abflussberechnungen (Kap. 7). Zur Modellierung der Zustände Nr. 1 bis Nr. 6 in Tabelle 10-1 wird das SOBEK-Modell der deutschen Elbe (ab Ustí n. L.) und der Saale (ab Halle-Trotha) an den genannten Randbedingungen mit Daten aus dem WTM-Modell der Saale (Kaulsdorf bis Halle-Trotha) und dem HEC-RAS/AquaLog-Modellsystem für die tschechischen Gewässerstrecken (oberhalb Ustí n. L.) gespeist. Für Modellzustand Nr. 0 bilden gemessene Ganglinien die Randbedingungen. Dementsprechend kann die Modellvalidierung für den "Ist-Zustand" in Anlage 2.3 und Kapitel 10.1.3 doppelt erfolgen, d. h. sowohl auf Grundlage gemessener (vgl. Tab 10-1: "*mS-mLi-mOr-mNe[MESS]*") als auch modellierter Randbedingungen (vgl. Tab 10-1: "*mS-mLi-mOr-mNe[MOD]*") an den Übergabepegeln zwischen den Modellen.

Da die 30 zu modellierenden Hochwasser eine große Zeitspanne zwischen 1970 und 2013 abdecken und in dieser nicht nur die Qualität der verwendeten hydrologischen Daten (siehe Kap. 8), sondern auch die lokalen Durchflussverhältnisse (bspw. manifestiert anhand zeitlich veränderter Abflusskurven an Pegeln, vgl. Abb. 8-5) stark variieren können, wurden für die erlaubten Abweichungen zwischen Modell- und Messergebnissen keine strikten Vorgaben gemacht. Maximale Scheitelabflussdifferenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten von $\pm 10\%$ wurden an den Pegelstandorten angestrebt; von ebenso großer Bedeutung für die Bewertung der Modellqualität waren jedoch die visuelle Überprüfung des Ganglinienverlaufs und die Plausibilität der Modellergebnisse im Längsschnitt entlang der Elbe. Besonders im Zuge der Längsschnittbetrachtungen konnten Implausibilitäten in den gemessenen Ganglinien und Scheitelabflüssen erkannt werden, die bei der isolierten Qualitätssicherung für einzelne Pegel im Rahmen der Datengenerierung (Kap. 8) nicht auffällig geworden waren.

Generell lässt sich feststellen, dass die Modellierungsergebnisse für die "Ist-Zustände" (auch für ältere Hochwasserereignisse) eine zufriedenstellende Qualität aufweisen. Auffälligkeiten im Abgleich zwischen Messung und Modellierung wurden hinsichtlich ihrer Ursache geprüft

und im Projektzusammenhang bewertet. Wesentliche Merkmale der Modellierung für die "Ist-Zustände" werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

10.1.1 WTM-Modell der Saale zwischen Kaulsdorf und Halle-Trotha

Die Auswertung der simulierten Scheitelabflüsse (Modell "*mS-mLi-mOr-mNe[MESS]*") im Vergleich zu den vorliegenden Messwerten des Abflusses erfolgten auf der Modellstrecke des WTM-Modells an den sechs im Modelllayout (Abb. 7-6) dargestellten Saalepegeln Saalfeld-Remschütz, Rudolstadt, Rothenstein, Camburg-Stöben, Naumburg-Grochlitz und Halle-Trotha (Anlage 2.1). Tabelle 10-2 stellt die Ergebnisse im Überblick dar.

	Spannweite der Abweichungen zw. Modellergebnis und Messwert (absolut)		Spannw Abweicht	veite der 1ngen zw.	Mittlere
Pegel			Modellerg	gebnis und	Abweichung*
			Messwert (prozentual)		
	von[<i>m³/s</i>]	bis [<i>m³/s</i>]	von [%]	bis [%]	[%]
Saalfeld-Remschütz	-23	+7	-67	+7	10,6
Rudolstadt	-24	+20	-38	+12	7,5
Rothenstein	-45	+17	-38	+13	6,7
Camburg-Stöben	-50	+27	-29	+13	7,5
Naumburg-Grochlitz	-43	+38	-15	+13	4,9
Halle-Trotha	-101	+49	-12	+15	4,8

Tabelle 10-2: Vergleich gemessener und modellierter Scheitelabflüsse des WTM-Modells der Saale

 (*mittlere Abweichung berechnet als Mittelwert der Beträge der Scheiteldifferenzen)

Die Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Scheitelabflüssen an den Saalepegeln betragen im Durchschnitt $\leq 10\%$. Trotzdem lassen sich für einzelne Hochwasser und Pegel auch deutlichere Abweichungen erkennen. Diese treten vor allem bei den in Kapitel 7.2.2 als "Kleinstereignisse" bezeichneten "Hochwassern" im mittleren und niedrigen Abflussbereich (MHQ/MQ) auf (Tab. 7-1). Beispielsweise resultiert die in Tab. 10-2 genannte Unterschätzung des Scheitelabflusses von 38 % am Pegel Rudolstadt aus der unbefriedigenden Modellierung des Hochwassers vom August 2002, bei dem in der Spitze mit 29 m³/s allerdings nur ein Abfluss in der Größenordnung ~ MQ gemessen wurde. Für diese Abflussereignisse, die als Hochwasser in der Saale (und somit auch in ihrem Einfluss für die Elbe) kaum eine Rolle spielen, wurde auf eine weitere Optimierung der Ergebnisse (bspw. durch eine nochmalige niedrigwasserspezifische Anpassung des Modells) verzichtet. Dies galt ebenfalls für einzelne Hochwasser, wenn die Modellergebnisse an ober- und unterstromigen Standorten nachvollziehbar (belastbar) waren, am ausgewerteten Pegel selbst jedoch Unstimmigkeiten im Vergleich mit den gemessenen Daten aufgetreten sind. Häufig wurden in solchen Fällen nicht plausible Messdaten als Ursache ausgemacht.

> Abbildung 10-1 zeigt die Ergebnisse des WTM-Modells für den Pegel Saalfeld-Remschütz für das Hochwasser im Juni 2013. Deutlich zu erkennen ist nicht nur die gute Stimmigkeit zwischen schwarzer, modellierter und gelber, gemessener Ganglinie, sondern auch der stark durch die Talsperrensteuerung beeinflusste Abfluss am flussaufwärts gelegenen Pegel Kaulsdorf (blaue, gestufte Linie) sowie der Beitrag des Zuflusses Loquitz (orange Linie) zur Wellenform des Hochwassers in diesem Saaleabschnitt. Im anlaufenden Ast der Welle in Kaulsdorf bildet die einmündende Loquitz ihren Scheitel aus und trägt in ähnlicher Größenordnung wie die Saale zur breiten Hochwasserwelle in Saalfeld-Remschütz am 02.06.2013 bei.



Abbildung 10-1: Darstellung der gemessenen Ganglinien am Pegel Kaulsdorf (Saale) und Eichicht (Loquitz) sowie Vergleich zwischen den Mess- und Modellwerten des Abflusses am Pegel Saalfeld-Remschütz für das Hochwasser von Juni 2013

10.1.2 Tschechisches Modellsystem oberhalb von Ustí n. L.

Hinsichtlich der Auswertung der berechneten Scheitelabflüsse galten für das tschechische Modellsystem dieselben Kriterien wie für die Pegel auf der Strecke des WTM-Modells der Saale. Für die übergeordnete deutsch-tschechische Bewertung der Modellgüte wurden die Pegel Prag-Chuchle (Moldau), Louny (Eger) und Mělník und Ustí n. L. (beide an der Elbe) hinsichtlich des Ganglinienverlaufs und ihrer Scheitelabflüsse analysiert. Die Ergebnisse der Modellierung werden im Detail in BALVÍN ET AL. (2017) vorgestellt und interpretiert. Alle berechneten Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Scheitelabflüssen an den vier Pegeln befinden sich in tabellarischer und grafischer Form in Anlage 2.2 zum vorliegenden Bericht, eine kurze Zusammenfassung liefert Tabelle 10-3.

Pegel	Spannweite der gen zw. Modell Messwert	r Abweichun- lergebnis und (absolut)	Spannweite de gen zw. Model Messwert (j	Mittlere Abweichung*	
	von [<i>m³/s</i>]	bis [<i>m³/s</i>]	von [%]	bis [%]	[%]
Prag-Chuchle	+55	-47	+6	-10	2,4
Mělník	+111	-254	+19	-9	3,7
Louny	+238	-53	+96	-19	14,8
Ustí n. L.	+86	-66	+4	+4	1.8

Tabelle 10-3: Vergleich gemessener und modellierter Scheitelabflüsse des tschechischen Modellsys-tems (*mittlere Abweichung berechnet als Mittelwert der Beträge der Scheiteldifferenzen)

Für alle vier betrachteten Pegel sind im Mittel gute Übereinstimmungen zwischen berechneten und modellierten Scheiteln vorzufinden. Lediglich am Pegel Louny (Eger) unterhalb der Talsperre Nechranice werden in mehreren Fällen (vgl. Anlage 2.2) größere Differenzen modelliert. Diese lassen sich (vergleichbar zur Situation an der Saale) u.a. auf die unzureichende Abbildung kleiner Abflussereignisse im Mittel- und Niedrigwasserbereich zurückführen (bspw. Hochwasser vom Juli 1997: Überschätzung um 96 % entspricht 16 m³/s), aber auch auf nicht vertrauenswürdige Messdaten, wie sie zum Beispiel in Abbildung 10-2 für das Hochwasser vom März 1981 dargestellt sind. Der modellierte Scheitelabfluss liegt in diesem Beispiel 238 m³/s höher als die gemessene Abflussspitze, was eine Abweichung von 83 % bedeutet.



Abbildung 10-2: Vergleich der modellierten (blau) und gemessenen (rot) Abflussganglinie am Pegel Louny für das Hochwasser vom März 1981

Abbildung 10-3 stellt als Säulendiagramm die Modellqualität für den Übergabepegel Ustí n. L. dar. Es zeigt sich deutlich, dass nur geringe Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Scheitelabflüssen vorliegen. Die Abweichungen bewegen sich zwischen -4 % und +4 % bzw. zwischen -86 m³/s und +66 m³/s und zeugen nicht nur von der hohen Qualität des eingesetzten tschechischen Modellsystems, sondern auch von der umfangreichen gemeinsamen deutsch-tschechischen Plausibilisierung der Ergebnisse.



Abbildung 10-3: Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Scheitelwerten des Abflusses am Pegel Ustí nad Labem für 30 modellierte Hochwasserereignisse

10.1.3 SOBEK-Modell der Elbe (ab Ústí n. L) und Saale (ab Halle-Trotha)

Für die Modellierung der deutschen Elbestrecke ab Ústí n. L und der Saale ab Halle-Trotha wurde im Projekt das existierende SOBEK-Modell der BfG verwendet (Kap. 7.2.3). Eine Bewertung des modellierten Ist-Zustands kann erfolgen, in dem die gemessenen Scheitelabflüsse an den Pegeln mit Berechnungen verglichen werden, bei denen entweder gemessene (Modellzustand "*mS-mLi-mOr-mNe[MESS]*", vgl. Tab. 10-1) oder modellierte (Modellzustand "*mS-mLi-mOr-mNe[MOD]*", s. o.) Ganglinien an den Pegeln Ústí n. L. und Halle-Trotha als Randbedingung in das SOBEK- Modell eingehen (s. o.). Für den Fall der Verwendung gemessener Input-Daten können die Berechnungsergebnisse herangezogen werden, um die Modellgüte des SOBEK-Modells der BfG zu beschreiben. Unsicherheiten, die aus der Übergabe von Ergebnissen der beiden zuvor genannten Modelle resultieren können, spielen hierbei keine Rolle. Diese sind hingegen in den Ergebnissen des Modellzustands "*mS-mLi-mOr-mNe[MOD]*" enthalten. Es ist deshalb zu erwarten, dass die prozentualen Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Scheiteln für diesen Modellzustand
größer sind; sie sollten jedoch auch nicht deutlich schlechter als die Ergebnisse des Zustands "*mS-mLi-mOr-mNe[MESS]*" ausfallen, da nur die so ermittelten Scheitelabflüsse in die Wirkungsanalyse der tschechischen Talsperren und nachfolgend in die Ableitung der Transformationsfunktionen zur Homogenisierung der langen HQ-Reihen eingehen (vgl. Kap.11).

Tabelle 10-4 zeigt die relativen Scheiteldifferenzen zu den Messwerten für die beiden genannten Modellzustände für alle Pegel der deutschen Elbe. Angaben als absolute Scheitelabflussdifferenzen (in m³/s) sind Anlage 2.3 zu entnehmen.

Tabelle 10-4: Vergleich gemessener und modellierter Scheitelabflüsse des SOBEK-Modells der Elbe für zwei Ist-Zustände des SOBEK-Modells (**mittlere Abweichung berechnet als Mittelwert der Beträge der Scheiteldifferenzen*)

Pegel	Spannweite chungen zw gebnis und (RB: Me	der Abwei- v. Modeller- l Messwert essdaten)	Mittlere Abwei- chung*	Spannweite chungen zw gebnis und (RB: Moo	Mittlere Abwei- chung*	
	von [%]	bis [%]	[%]	von [%]	bis [%]	[%]
Schöna	-8	+20	5,9	-9	+20	5,7
Dresden	-8	+12	4,1	-10	+12	3,8
Torgau	-8	+34	8,7	-11	+30	8,2
LWittenberg	-21	+18	8,2	-23	+17	7,9
Aken	-18	+24	8,3	-22	+24	8,5
Barby	-9	+21	7,3	-11	+20	7,6
Magdeburg-S.	-14	+32	8,3	-15	+31	8,5
Tangermünde	-4	+28	8,6	-6	+28	8,7
Wittenberge	-6	+24	7,1	-5	+24	6,9
Neu Darchau	-14	+37	9,8	-14	+36	9,7

Aus den Ergebnissen in Tabelle 10-4 wird deutlich, dass sich sowohl die maximalen und minimalen als auch die mittleren (prozentualen) Scheiteldifferenzen (Abweichungen) in Abhängigkeit von den verwendeten Randbedingungen (Mess- bzw. Modelldaten) kaum unterscheiden. Eine Verschlechterung der Modellergebnisse ist nicht festzustellen. Anhand der individuellen Ergebnisse einzelner Hochwasser ist jedoch zu erkennen, dass die verwendete obere Randbedingung maßgeblich Einfluss auf die Güte der Modellierung flussabwärts besitzen kann. Dies gilt bspw. für das Hochwasser vom August 2006, dessen Messwerte und Modellergebnisse für die Pegel Ústí n. L. und Dresden in Abbildung 10-4 dargestellt sind. Bei Verwendung der Messwertganglinie des Pegel Ustí n. L. als Input in das SOBEK-Modell wird der ansteigende Ast der Welle deutlich besser abgebildet als bei Verwendung der entsprechenden Modellergebnisse als Eingangsdaten für das deutsche Elbemodell. Auf den Scheitelabfluss, der schlussendlich ausgewertet wird, besitzt dieser Unterschied im vorliegenden Beispiel allerdings kaum Einfluss.



Abbildung 10-4: Modellergebnisse am Pegel Dresden für die Welle vom August 2006 auf Basis gemessener und modellierter Ganglinien in Ustí n. L. (Modellrandbedingung)

Abbildung 10-5 zeigt abschließend für alle untersuchten Hochwasser zwischen 1970 und 2013 die modellierten und gemessenen Scheitelabflüsse sowie die Scheiteldifferenzen für den Pegel Wittenberge unterhalb der Havelmündung.



Abbildung 10-5: Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Scheitelwerten des Abflusses am Pegel Wittenberge für 30 modellierte Hochwasserereignisse (*Modellierung ohne Deichbrüche, **mit Deichbrüchen)

Offensichtlich sind die großen Scheitelabflussdifferenzen bei den extremen Hochwassern vom August 2002 und vom Juni 2013, bei denen der Einfluss der Deichbrüche in den Modellrechnungen zur Ableitung der Transformationsfunktionen nicht berücksichtigt wird. Sind diese im Modell implementiert (Ergebnisse ebenfalls im Diagramm angegeben), ordnet sich die Qualität der Modellergebnisse wieder in die Größenordnung der weiteren analysierten Hochwasser ein. Vor dem Hintergrund der im Projekt gegebenen Randbedingungen (lange abzudeckende Zeitspanne modellierter Hochwasser, Kopplung verschiedener Modelle und Modelltechnologien, Unsicherheiten in den zugrundeliegenden hydrologischen Messdaten, große Bandbreite der Hochwasser zwischen Mittel- und Hochwasser) lassen sich die erzeugten Modellergebnisse für beide "Ist-Zustände" als zufriedenstellend bewerten. Sie bilden zudem eine gute Ausgangslage für die weitergehenden Modellberechnungen zur Ermittlung der Wirkung der Talsperren in Tschechien und an der Saale. Insgesamt sind die Ergebnisse für den Ist-Zustand auch ein Beleg für die gute Qualität der gemessenen und rekonstruierten Abflussganglinien, die als Randbedingungen für die Simulation der 30 Hochwasser an der Elbe verwendet wurden.

10.2 Zustand 2013 / Vergleich von Ist-Zustand und Zustand 2013

In Grundzügen in Kapitel 2.4.2 und im Detail in BALVÍN ET AL. (2017) wird für die tschechischen Talsperren erläutert, in welcher Art und Weise sich die Reglements und Randbedingungen für die Steuerung seit Bau der jeweiligen Talsperren verändert und weiterentwickelt haben. Anpassungen der Steuerungsanweisungen können sowohl aus baulichen Veränderungen an (besserer Regulierbarkeit der Auslassbauwerke) und unterhalb der Talsperren (höheres Hochwasserschutzniveau) als auch aus veränderten Vorgaben für die Bewirtschaftung (bspw. Festlegung eines größeren gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraums) resultieren. Auch die Verfügbarkeit höherwertiger hydrologischer Daten, u.a. für die Hochwasservorhersage, können in diesem Zusammenhang zu einer präzisieren Talsperrensteuerung beitragen.

Um herauszufinden, welche der zahlreichen erfolgten Änderungen für den Hochwasserwellenablauf und die Scheitelabflüsse von überregionaler Relevanz waren, wurde vereinbart, zusätzlich zum "Ist-Zustand" ("*mS-mLi-mOr-mNe[MOD]*", vgl. Tab. 10-1) einen Modellzustand "2013" ("*mS-mLi-mOr-mNe[2013]*") zu berechnen. Er berücksichtigt die neuesten Vorgaben zur Talsperrensteuerung; das Jahr 2013 wurde als Bezugszustand gewählt, weil dieses das letzte Jahr der Zeitreihe 1890-2013 darstellt, die im Rahmen des Projekts homogenisiert werden soll. Auf Grundlage der Kenntnis, wie groß die Scheiteldifferenzen zwischen den beiden Zuständen ausfallen und ob hiervon spezielle Ereignistypen (bspw. Sommer- oder Winterhochwasser, Ereignisse in speziellen Einzugsgebieten) betroffen sind, können dann Schlüsse für die Ableitung der Transformationsfunktionen (vgl. Kap. 11) gezogen werden.

Zahlreiche Modellläufe, deren Erkenntnisse in BALVÍN ET AL. (2017) beschrieben sind, wurden durchgeführt, um die Auswirkungen einzelner Anpassungen der Steuerungsanweisungen

zu bewerten. Schlussendlich verblieben im Portfolio der 30 Hochwasser 12 Ereignisse, bei denen die Anpassungen der Steuerungsanweisungen zu veränderten Berechnungsergebnissen führten. Hierzu zählen neun Hochwasser an der Eger sowie drei an der Moldau. Bauliche Ursachen, die in Zusammenhang mit einer optimierten Vorhersage eine verfeinerte Steuerung des Abflusses aus den Talsperren zulassen, sorgen dafür, dass am Pegel Louny (unterhalb der Talsperre Nechranice) um bis zu 157 m³/s niedrigere Scheitelabflüsse (Hochwasser vom Dezember 1974) für den Zustand 2013 (im Vergleich zum Ist-Zustand) modelliert werden. Für die Hochwasser vom August 1977 und April 1994 an der Moldau resultieren niedrigere Scheitelabflüsse am Pegel Prag-Chuchle aus veränderten Randbedingungen (Startwasserstand im Orlík-Stausee bzw. Steuerung der obersten Talsperre Lipno). Die Scheitelabflüsse liegen hierdurch im Zustand "2013" 100 m³/s bzw. 50 m³/s niedriger.

Bedeutend sind die Scheiteldifferenzen zwischen "Ist-Zustand" und "Zustand 2013" beim extremen Hochwasser vom August 2002. Hier sorgte technisches Versagen am Kraftwerk dafür, dass deutlich mehr Abfluss zurückgehalten wurde, als im eigentlichen Steuerungsreglement vorgesehen ist. Da die Berechnungen im Zustand "2013" diese Fehlfunktion nicht modellieren, steht in diesen Modellläufen eine um 600 m³/s größere Abflusskapazität zur Verfügung. Der Rückhalt in der Talsperre Orlík fällt deshalb für diesen Modellzustand geringer aus, am Pegel Prag-Chuchle ergibt sich eine Erhöhung des Scheitelabflusses im Zustand "2013" um 247 m³/s (vgl. Anlage 3.2).



Abbildung 10-6: Vergleich der berechneten Scheitelabflussdifferenzen für den Ist-Zustand und den Zustand 2013 an verschiedenen Pegeln an Elbe, Moldau und Eger für alle 30 analysierten Hochwasser

Abbildung 10-6 gibt einen Überblick über die Differenzen zwischen den in beiden Zuständen modellierten Scheitelabflüssen. Die Daten für Pegel Louny und Pegel Prag-Chuchle beschreiben hierbei die Auswirkungen angepasster Steuerungen direkt unterhalb der Talsperren, die Säulen für die Pegel Ustí n. L., Barby und Wittenberge zeigen die gesamtheitlichen Auswirkung der beschriebenen Effekte entlang der tschechischen und deutschen Elbe.

Anhand der Abbildung wird deutlich, dass es bei der überwiegenden Zahl der Hochwasser (die eine Veränderung erfahren) zu kleineren Scheitelabflüssen im Zustand "2013" kommt. Lediglich für vier Ereignisse werden (an mehreren Pegeln bzw. in bedeutendem Ausmaß) höhere Scheitelabflüsse berechnet: darunter befindet sich das Hochwasser vom August 2002 sowie drei weitere Ereignisse (März 1970A, März 1981, Juli 1997), bei denen Differenzen des Eger-Scheitels zu verzeichnen sind (Anlage 3.2). Diese verändern bei Aufeinandertreffen von Eger- und Elbewelle den anlaufenden Ast der Welle, so dass es (teilweise erst weit unterstrom, vgl. Hochwasser vom März 1981) insgesamt zu einem höheren Scheitelabfluss kommt. Darüber hinaus ist in der Darstellung zu erkennen, dass ab dem Hochwasser im Januar 2003 keine wesentlichen Differenzen zwischen beiden Zuständen mehr auftreten. Dieser Aspekt ist relevant für die Ableitung der Transformationsfunktionen, sich daraus ergebende Schlussfolgerungen werden in Kapitel 11.1 diskutiert.

10.3 Zustand 1890 / Vergleich von Zustand 2013 und Zustand 1890

Die Modellierung des Zustands "1890" (Bezeichnung lt. Tab 10-1: "*oS-oLi-oOr-oNe(1890)*") soll den Ablauf der Hochwasser beschreiben, wenn in einem "natürlichen" Gewässerzustand keine anthropogenen Beeinflussungen durch Talsperren aufgetreten wären. Die hierzu verwendeten Modelle und Berechnungsverfahren werden in Kapitel 7.1.1 (tschechische Talsperren) und Kapitel 7.2.3 (Saaletalsperren) beschrieben. Die Simulationsergebnisse für diesen Zustand sind u.a. deshalb essentiell, weil sie Grundlage *jeder* abzuleitenden Transformationsfunktion für die Homogenisierung in den Zustand "1890" sind (vgl. Kap.11.1). Außerdem lässt sich im Vergleich zwischen Zustand "1890" und Zustand "2013" die maximale Bandbreite der scheitelreduzierenden Wirkungen der Talsperren für die 30 ausgewählten Hochwasser ermitteln. Diese werden für alle Pegel zwischen Prag-Chuchle (Moldau) und Neu Darchau (Elbe) in Abbildung 10-7 (Absolutwerte in m³/s) und Abbildung 10-8 (relative Werte in %) präsentiert und sind in tabellarischer Form (Absolutwerte) in Anlage 3 zu finden.

Insgesamt bestätigt sich aufgrund der vorgenommenen Modellberechnungen, dass Scheitelreduktionen, welche durch Talsperren in Tschechien und Thüringen hervorgerufen werden, entlang der Elbe (sowohl absolut als auch prozentual) bei einer Vielzahl der untersuchten Hochwasser zwischen 1970 und 2013 überregional wirksam sind und bis weit nach unterstrom an der deutschen Mittelelbe noch zu bedeutenden Scheitelreduktionen bis zu > 800 m³/s (Tangermünde, Hochwasser vom April 2006) führen. Die deutschen Unterlieger profitieren somit erheblich von den Maßnahmen der tschechischen und thüringischen Ober-

lieger (vgl. auch Kap. 2.2). Markant sind in den Längsschnittdarstellungen für eine große Anzahl von Ereignissen "Sprünge" in den modellierten Scheitelreduzierungen zwischen Mělník und Ustí n. L. (bspw. für das Hochwasser vom März 1987A) sowie zwischen Aken und Barby (z. B. für das Hochwasser vom Januar 2002A). Sie treten immer dann auf, wenn Talsperrenwirkungen an den Nebenflüssen in besonderem Maße auch für die Elbe wirken. Dies ist beispielsweise nicht der Fall beim Hochwasser vom August 2002, wo die Saale aufgrund ihres geringen Abflusses keinen Beitrag zur Scheitelreduktion an der Elbe liefern konnte.

Einer der wenigen Fälle, in denen das Zusammenspiel der Wellenabläufe von Elbe und ihren Nebenflüssen dafür sorgt, dass die Talsperrenwirkung bereichsweise "verpufft", zeigt sich für das Hochwasser vom Dezember 1974. Bei diesem wird durch die Mulde einem breiten Scheitelplateau in der Elbe temporär ein zweiter (späterer) Scheitel aufgeprägt, dessen Höhe nur in geringem Maße durch die tschechischen Talsperren beeinflusst wird. Nach Zufluss der Saale, wo in diesem Ereignis ein deutlicher Rückhalt stattgefunden hatte, dominiert wieder der ursprüngliche Scheitel. Die Scheitelreduktion in Barby liegt somit wieder auf dem ursprünglichen Niveau.



Abbildung 10-7: Maximale, absolute Bandbreiten der Talsperrenwirkung zwischen Prag-Chuchle und Neu Darchau; berechnet aus dem Vergleich der Ergebnisse für die Modellzustände "1890" und "2013"

Der Vergleich zu den im "LABEL"-Projekt (BFG 2012) und den ad-hoc-Untersuchungen zum Hochwasser 2013 (BFG 2013) ermittelten Scheitelreduktionen für die Hochwasser 2002, 2006, 2011 und 2013, die in Abbildung 1-1 wasserstandsbezogen abgebildet sind, bestätigt weitgehend die damaligen Modellierungen. Die berechneten Scheitelreduktionen können aufgrund der angepassten Modellkonfiguration/-annahmen zwar um ~ 100-200 m³/s von den damaligen Berechnungen abweichen, die Größenordnungen der Talsperrenwirkung (mehrere 100 m³/s) und ihr großräumiges Zusammenspiel mit der Hochwassergenese im Wellenablauf werden jedoch bestätigt. Das Ereignis vom Juni 2009 zeigt hingegen "negative" Effekte der Talsperren, da an der Moldau bei einem Abfluss von ~ 3*MQ am Pegel Prag-Chuchle nicht die Steuerung im Hochwasserfall, sondern vermutlich angepasste Vorschriften für Mittel- und Niedrigwasserabflüsse zu Buche schlagen.



Abbildung 10-8: Maximale, relative Bandbreiten der Talsperrenwirkung zwischen Prag-Chuchle und Neu Darchau; berechnet aus dem Vergleich der Ergebnisse für die Modellzustände "1890" und "2013"

Die prozentuale Darstellung der modellierten Scheitelabflussreduktion zeigt entlang der Elbe eine Abnahme der Talsperrenwirkung nach unterstrom. Während in Prag-Chuchle Scheitelreduktionen durch Talsperren zwischen 0 % (wenn keine Wirkung vorhanden ist) und < 50 % möglich sind, betragen diese am Pegel Neu Darchau immerhin noch bis zu 20 % des unbeeinflussten Scheitelwerts. In Abbildung 10-7 dominiert das Hochwasser vom April 2006 in der absoluten Scheitelreduktion deutlich, da bei diesem auch unter dem Eindruck des gerade abgelaufenen extremen Hochwassers im August 2002 und der wachsenden Schneedecke im

> Einzugsgebiet im Winter 2005/2006 eine besonders starke Vorentleerung der Talsperren betrieben wurde (Abb. 2-19). Die größte prozentuale Scheitelreduktion erfolgte beim Hochwasser vom März 2005. Dieses hat die "Einsatzkriterien" an der Moldau nur geringfügig überschritten, so dass die Talsperren der dortigen Kaskade besonders gut wirken konnten.

10.4 Ergebnisse der Simulationsberechnungen für Zwischenzustände

Entsprechend der unterschiedlichen Inbetriebnahmen der Talsperren wurden weitere sogenannte "Zwischenzustände", die nur einen Teil der relevanten Rückhalteräume berücksichtigen, berechnet. Es handelt sich hierbei um die drei in Tabelle 10-1 aufgelisteten Zustände, die für die Homogenisierung der HQ-Werte zwischen 1942 und 1967 Anwendung finden sollen. Ihre wesentlichen Charakteristika und Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben. Wie für die Zustände "1890" und "2013" werden auch für Zwischenzustände immer alle 30 Hochwasserereignisse modelliert.

10.4.1 Zustand mit den Saale-Talsperren

Der Zustand "*mS-oLi-oOr-oNe*" berücksichtigt nur die Wirkung der Saaletalsperren und ist somit an den tschechischen und deutschen Pegeln oberhalb der Saalemündung identisch mit dem "natürlichen" Zustand (vgl. Anlage 3.3). Auswertungen der BfG, die im Rahmen der Abschlusspräsentation zu den Berechnungen an der Saale der TLUG in Jena im November 2016 vorgestellt wurden, zeigen, dass der alleinige Einsatz der Saaletalsperren bei einzelnen Hochwassern des 30er-Kollektivs eine bis zu ~ 175 m³/s große Scheitelreduktion an der Elbe am Pegel Barby hervorrufen kann (vgl. Abb. 10-9). Bei bedeutenden Elbe- und Saalehochwassern (wie 2006 und 2013) kann dieser Einfluss (relativ ausgedrückt) ~ 2 % des Scheitels, bei anderen Ereigniskonstellationen (bspw. mit großem Saale-, aber vergleichsweise kleinem Elbehochwasser) bis zu 6 % des Scheitels ausmachen.

10.4.2 Zustand mit den Saale-Talsperren und der Talsperre Lipno

Der Zustand "*mS-mLi-oOr-oNe*" unterscheidet sich im tschechischen Elbegebiet, wo die Saaletalsperren keine Relevanz für die Scheitelabflüsse besitzen, nur geringfügig vom Modell für den Zustand "1890". Nichtsdestotrotz zeigt die in diesem Fall isoliert vorgenommene Betrachtung der Talsperre Lipno für ausgewählte Ereignisse sehr deutliche Scheitelreduktionen in Prag-Chuchle und Ustí n. L., die im Wellenablauf so auch bis an die untere Mittelelbe transportiert werden können. Besonders für Ereignisse, die im oberen Moldaugebiet ihren Ereignisschwerpunkt besitzen (bspw. bei den Hochwassern vom März 1981 und Dezember 1993, wo der Zufluss zur Talsperre Lipno > HQ₁₀₀ war), können im Vergleich zum "natürlichen" Zustand (1890) Scheitelabflussreduktionen von bis zu ~ 250 m³/s hervorgerufen werden (Abb. 10-10).



Abbildung 10-9: Scheitelreduzierende Wirkungen der Saale-Talsperren am Pegel Barby an der Elbe (berechnet als Differenz der Modellzustände "*mS-oLi-oOr-oNe*" und "*oS-oLi-oOr-oNe*")



Abbildung 10-10: Scheitelreduzierende Wirkung der Talsperre Lipno am Pegel Prag-Chuchle und am Pegel Ustí n. L. für 30 Hochwasserereignisse (berechnet als Differenz der Modellzustände "*mS-mLi-oOr-oNe*" und "*oS-oLi-oOr-oNe*")

10.4.3 Zustand mit den Saale-Talsperren und den Talsperren Lipno und Orlik

Der Zustand "*mS-mLi-mOr-oNe*" unterscheidet sich vom Ist-Zustand nur durch das Fehlen der Talsperre Nechranice. Für alle Hochwasser, bei denen bedeutende Effekte durch die Talsperre Nechranice an der Elbe hervorgerufen werden (bspw. bei den Winterhochwassern vom April 2006 und Januar 2011) sind deutliche Veränderungen der Scheitelabflüsse in diesem Zwischenzustand zu verzeichnen.

Abbildung 10-11 fasst abschließend die berechneten Scheitelabflüsse aller sechs Modellzustände, die für die Ableitung der Transformationsfunktionen verwendet werden, nochmals beispielhaft für den Pegel Barby zusammen. Für alle weiteren untersuchten Pegel in Deutschland und Tschechien sind die berechneten Scheitelabflüsse tabellarisch und als entsprechende Säulendiagramme in Anlage 3 zu finden.



Abbildung 10-11: Berechnete Scheitelabflüsse und -reduktionen für alle 30 Hochwasser und sechs Modellzustände am Pegel Barby

11 Ermittlung von Transformationsfunktionen zur zustandsbezogenen Umrechnung von HQ-Werten

Aus den Simulationsberechnungen (Kap. 10) liegen nun für das ausgewählte Kollektiv der 30 Hochwasser für sechs unterschiedliche Modellzustände berechnete Scheitelabflüsse für neun Elbepegel in Deutschland vor, die mittels Regressionsbeziehungen pegelbezogen in einen statistischen Zusammenhang gebracht werden müssen. Anhand dieser Beziehungen, die im Sinne von (Transformations-)Funktionen jeweils zwischen den Werten zweier Teilzeiträume der langen HQ-Reihen anwendbar sind, können anschließend die inhomogenen Reihen in (hinsichtlich des Talsperreneinflusses) homogene Reihen umgerechnet werden. Die Homogenisierung erfolgt sowohl in den natürlichen Zustand "1890" als auch in den heutigen Zustand "2013".

11.1 Grundsätzliches Vorgehen zur Ableitung der zustandsbezogenen Transformationsfunktionen für Elbepegel

Abbildung 6-3 zeigt in Kapitel 6.2 die inhomogene HQ-Reihe 1890-2013 des Pegels Barby. Als weitestgehend homogen kann entsprechend der dortigen Ausführungen die Teilreihe 1890-1932 (43 Werte) gewertet werden, da ihre Abflüsse noch nicht vom Betrieb der berücksichtigten Talsperren beeinflusst waren. Ebenso gilt dies für die Werte ab 1968 (46 Werte). Ab diesem Jahr waren bereits alle relevanten Talsperren in Betrieb. Zwischen 1932 und 1968 wurden weitere vier homogene Teilzeiträume identifiziert, die zwischen 3 und 18 jährliche HQ-Werte beinhalten. Insgesamt müssten somit auf Basis dieser Analyse sechs homogene Teilzeitreihen unterschieden werden.

Kapitel 2.4.3 beschreibt die generelle Funktionsweise und Steuerung der Saalekaskade. Dabei wird betont, dass ihre Talsperren nicht einzeln, sondern im Verbund bewirtschaftet und gesteuert werden. Dies spiegelt sich in der Herangehensweise zur Berechnung der Talsperrenwirkung wieder (Kap. 7.2.1), bei der die Effekte einzelner Rückhalteräume methodenbedingt nicht nachgewiesen werden können. Auch wenn zwischen der Inbetriebnahme der Talsperren Bleiloch (1933) und Hohenwarte (1942, vgl. Kap. 6.2) eine Zeitspanne von etwa einer Dekade liegt und somit die Bildung einer weiteren homogenen Teilzeitreihe 1933-1941 gerechtfertigt wäre, ist dies in der praktischen Umsetzung im Projekt nicht möglich. Aufgrund fehlender berechneter Scheitelabflüsse (s. o.) für solch einen Modellzustand, in dem nur die Talsperre Bleiloch vorhanden ist, können keine Transformationsfunktionen abgeleitet werden. Da eine überwiegende Anzahl der Hochwasser im Zeitraum 1933 bis 1941 an wichtigen Saalepegeln im Abflussbereich zwischen MQ und < MHQ einsortiert werden kann und deshalb

> für diese im Projekt von einer eher geringen scheitelreduzierenden Wirkung an der Elbe ausgegangen wird, wurden die HQ-Werte zwischen 1933 und 1941 der homogenen, natürlichen Reihe zugeordnet. In Abbildung 11-1, die exemplarisch die inhomogene HQ-Reihe für den Pegel Wittenberge präsentiert, ergibt sich somit ein homogener Teilzeitraum 1890-1941.



Abbildung 11-1: Für die Ableitung der Transformationsfunktionen festgelegte homogene Teilzeiträume mit Darstellung der Homogenisierungsvorschriften (exemplarisch für die HQ-Reihe des Pegels Wittenberge) für die Umrechnung in den homogenen Zustand 1890

Weiterhin bedeutend für die Definition homogener Teilzeiträume sind die in Kapitel 10.2 beschriebenen Modellierungsergebnisse für den Zustand "2013". Dass nach dem Augusthochwasser 2002 in den Modellierungen keine Unterschiede mehr zwischen dem "Ist-Zustand" und dem "Zustand 2013" festgestellt werden können (Abb. 10-6), war Anlass dafür, einen weiteren homogenen Teilzeitraum zwischen 2003 und 2013 zu definieren. Hintergründe und Vorteile dieser Festlegung werden in Kapitel 11.2.4 beschrieben.

Vergleicht man die Auswertung in Kapitel 6 (Abb. 6-3) sowie die endgültige Festlegung der homogenen Teilzeiträume in Abbildung 11-1, dann bleibt deren Anzahl konstant (sechs), es kommt jedoch - wie zuvor beschrieben - zur Verschiebung der Grenzen zwischen den Teilreihen. Benötigt werden weiterhin mindestens fünf unterschiedliche mathematische Beziehungen zur Umrechnung der gemessenen HQ-Werte in einen homogenen Zustand "1890" bzw. "2013". Basierend auf den zustandsbezogen berechneten Scheitelabflüssen für die 30 Hochwasser sind mittels Regressionsanalyse diese Homogenisierungsvorschriften aufzustellen und als Transformationsfunktionen anzuwenden. Die fünf zu erstellenden Homogenisierungsvorschriften, die ggf. weiter differenziert werden müssen (s. u.) sind in der genannten Abbildung als Pfeile dargestellt und werden in Tabelle 11-1 exemplarisch für die Umrechnung in den homogenen Zustand "1890" aufgeführt. Angegeben ist dort zusätzlich die Anzahl an HQ-Werten, die bei späterer Anwendung der jeweiligen Vorschrift umgerechnet werden. Für die 52 HQ-Werte zwischen 1890 und 1941 ist keine Transformation notwendig, da sie bereits im Zustand "1890" vorliegen. Dies gilt gleichermaßen für die 11 Werte zwischen 2003 und 2013 im Fall der Umrechnung in den homogenen Zustand "2013". Für die Umrechnung in diesen Zustand werden für jeden Pegel fünf weitere Homogenisierungsvorschriften benötigt.

Tabelle	11-1:	Anzuwendende	Homogenisieru	ungsvorschriften	für	die	Umrechnung	in	den	Zustand
1890 bei	Nutzu	ng bzgl. der Hoc	hwassergenese	undifferenzierter	Tra	nsfo	rmationsfunkt	ion	en	

Transformationsfun	Anwendung für Teilzeitraum	
HQ (Zustand von) \rightarrow HQ	(in Klammer: Anzahl der umzu-	
Zustand von	Zustand nach	rechnenden Werte)
mS-oLi-oOr-oNe	oS-oLi-oOr-oNe (1890)	1942 - 1959 (18)
mS-mLi-oOr-oNe	oS-oLi-oOr-oNe (1890)	1960 - 1962 (3)
mS-mLi-mOr-oNe	oS-oLi-oOr-oNe (1890)	1963 - 1968 (6)*
mS-mLi-mOr-mNe (MOD)	oS-oLi-oOr-oNe (1890)	1969 - 2002 (34)**
mS-mLi-mOr-mNe (2013)	oS-oLi-oOr-oNe (1890)	2003 - 2013 (11)

(* vgl. hierzu POH (2010): der Aufbau der Talsperre Nechranice erfolgte inkl. Füllung bis Dezember 1968; ** Zur Rolle des Hochwassers vom August 2002 bei der Ableitung und Anwendung der Transformationsfunktionen bitte auch Kapitel 11.2.4, letzter Absatz, berücksichtigen.)

Beispielhaft für den Pegel Wittenberge und die Umrechnung vom Zustand "2013" ("*mS-mLi-mOr-mNe*(2013)") in den Zustand "1890" ("*oS-oLi-oOr-oNe*(1890)") (in Tab. 11-1 grau hinterlegt) beschreibt Abbildung 11-2 das Vorgehen zur Ableitung einer Transformationsfunktion. Im linken Streudiagramm werden die berechneten Scheitelabflüsse im Zustand "*oS-oLi-oOr-oNe* (1890)" zur Scheitel<u>reduktion</u> bei Umrechnung in den Zustand "*mS-mLi-mOr-mNe*(2013)" in Beziehung gesetzt, im rechten Diagramm zum Scheitel<u>abfluss</u> in diesem Zustand. In den Diagrammen kommt der einfachste Fall einer möglichen Homogenisierungsvorschrift zur Anwendung: die Regressionsbeziehung ist linear und wird (zumindest im rechten Diagramm) bzgl. der Hochwassergenese undifferenziert auf Basis aller berechneter 30 Wertepaare ermittelt.

Die Anpassung einer einzigen Ausgleichsgerade gestaltet sich im linken Diagramm von Abbildung 11-2 (Scheitelabfluss ~ Scheitelreduktion) als schwierig, da die Einzelwerte der Scheitelreduktionen teilweise eine große Streuung von der Ausgleichsgerade aufweisen. Dies

> ist durchaus erwartbar, da entsprechend der unterschiedlichen Hochwassergenesen und Witterungsrandbedingungen (Winter-/Sommerereignisse, verschiedene Einzugsgebiete etc.) ganz unterschiedliche Talsperreneinflüsse auf Hochwasser mit vergleichbaren Scheitelabflüssen wirksam werden können. Der Zusammenhang zwischen Scheitelabfluss und Reduktion lässt sich mit Hilfe einer einzigen linearen Beziehung je Pegel vermutlich nicht abbilden; die dargestellte jahreszeitliche Differenzierung der Scheitelreduktionen für Sommer- und Winterereignisse bringt hier bereits eine Verbesserung. Offen ist ebenfalls, ob die Annahme eines linearen Zusammenhangs korrekt ist (vgl. Kap. 11.2.1).



Abbildung 11-2: Darstellung der Beziehungen zwischen den berechneten Scheitelabflüssen im Zustand "*oS-oLi-oOr-oNe(1890)*" und den jeweils berechneten (links) Scheitelreduktionen bzw. (rechts) Scheitelabflüssen im Zustand "*mS-mLi-mOr-mNe(2013)*" für den Pegel Wittenberge

Wie im rechten Diagramm von Abbildung 11-2 dargestellt, lassen sich die berechneten Scheitelabflüsse für unterschiedliche Zustände gut in eine lineare Beziehung zueinander setzen, da bei dieser Art der Korrelation nicht die Reduktionen betrachtet werden, sondern der Zusammenhang zwischen den Hochwasserscheiteln. Nur diese Regressionsbeziehungen werden verfahrensbedingt als Transformationsfunktionen (Scheitelabfluss ~ Scheitelabfluss) benötigt. Sie besitzen hohe Korrelationskoeffizienten r und hohe Bestimmtheitsmaße R² (vgl. Anlage 4). Lineare und hinsichtlich der Hochwassergenese undifferenzierte Beziehungen bieten somit bereits eine gute Ausgangsbasis für die Bildung der Homogenisierungsvorschriften. Vor dem Hintergrund der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Zusammenhänge müssen jedoch weitere Möglichkeiten zur Ableitung von Transformationsfunktionen untersucht werden. Die diesbezüglichen Fragestellungen werden im Folgenden kurz vorgestellt; Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus diesen weitergehenden Auswertungen, die im vorliegenden Bericht anhand der offiziellen Daten (OD; vgl. Kap. 3.3) für den Pegel Wittenberge erläutert werden, können dem Kapitel 11.2 entnommen werden:

- Welche Art der Regression soll Anwendung finden? Sind neben linearen Beziehungen weitere Funktionstypen (logarithmisch, exponentiell, polynomisch) denkbar und sinnvoll? (*siehe Kap. 11.2.1*)
- Wie stark müssen die anzuwendenden Transformationsfunktionen hinsichtlich der Hochwassergenese differenziert sein? Reicht eine undifferenzierte Ableitung aus oder muss zwischen Funktionen für Sommer- und Winterereignisse bzw. Ereignissen aus dem Moldaugebiet und dem tschechischen Elbegebiet unterschieden werden? (siehe Kap. 11.2.2)
- Welche Bedeutung besitzen die extremen Hochwasser der Jahre 2002 und 2013 für die Ableitung der Transformationsfunktionen? Aus den Abbildungen 11-2 (links) und 11-3 (rechts) wird bereits deutlich, dass beide Ereignisse weit außerhalb des Scheitelabflussbereichs liegen, der durch die verbleibenden (Sommer-)Ereignisse abgedeckt wird. (*siehe Kap. 11.2.3*)
- Welche Konsequenzen hat die zu Beginn des Kapitels beschriebene Unterscheidung zwischen einer homogenen Teilzeitreihe im "Ist-Zustand" und einer Teilzeitreihe im "Zustand 2013"? (*siehe Kap. 11.2.4*)

11.2 Merkmale der zustandsbezogenen Transformationsfunktionen

Ausgehend von der Annahme linearer, undifferenzierter Transformationsfunktionen für die deutschen Elbepegel (vgl. Kap. 11.1) soll in den folgenden Abschnitten geklärt werden, welche konkreten Eigenschaften (hinsichtlich Funktionstyp, Differenzierung, verwendete Datenbasis) die Homogenisierungsvorschriften besitzen müssen. Die hierzu notwendigen Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Projekts für die Pegel Wittenberge (vgl. folgende Unterkapitel) und Dresden (nicht dargestellt) und bezogen bei den Schlussfolgerungen mögliche Auswirkungen, nicht nur auf die Ergebnisse für homogene HQ-Reihen, sondern auch auf die daraus resultierende Extremwertstatistik mit ein. Zur Einschätzung der Effekte der verschiedenen transformationsbedingten Stichprobenmodifikationen wurden jeweils in einem vereinfachten Verfahren Hochwasserstatistiken für die "offiziellen Daten" (OD, vgl. Kap. 3.3) berechnet, die methodenbedingt nicht 1:1 mit den Endresultaten in Kapitel 12 vergleichbar sind.

11.2.1 Art der Regressionsbeziehung bzw. Transformationsfunktion

Prinzipiell ist es denkbar, dass die Transformationsfunktionen nicht durch lineare Beziehungen beschrieben werden. Anlass für diese Annahme gibt vor allem das tschechische Homogenisierungsprojekt aus dem Jahr 2006 (KAŠPÁREK ET AL. 2006), welches zum Schluss kommt, dass die größte absolute Scheitelreduktion durch Talsperren (mit Ausnahme des Stausees Nechranice) bei Hochwassern in der Größenordnung HQ₁₀-HQ₂₀ erzielt wird. Bei größeren Ereignissen nimmt die Wirkung der Talsperren It. der zitierten Studie wieder ab. Auf den ersten Blick ergibt sich somit aus der Extremwertstatistik kein linearer Zusammenhang zwischen Höhe des Ereignisses und Scheitelreduktion (vgl. hierzu auch Kap. 11.1). Im

> Rahmen des Projekts wurde deshalb die Möglichkeit untersucht, die Transformationsfunktionen mit Hilfe von logarithmischen, exponentiellen und polynomischen Beziehungen abzubilden. Abbildung 11-3 stellt (im Vorgriff auf die Schlussfolgerungen in Kapitel 11.2.2 für Sommer- und Winterereignisse differenziert) mögliche Transformationsfunktionen dar. Anhand der gezeigten Kurvenanpassung und mit Hilfe von (nicht im Rahmen des Berichts dargestellter) Residuenplots, die im Zuge der Methodenentwicklung und -anwendung für alle neun zu betrachtenden Elbepegel und alle Homogenisierungsvorschriften erstellt und ausgewertet wurden, wird deutlich, dass logarithmische und exponentielle Funktionen für die auf Sommerereignissen basierenden Kurven (rechtes Diagramm in Abbildung 11-3) funktionsbedingt systematische Abweichungen zeigen. Auch aus hydrologisch-fachlicher Sicht wäre nur schwer erklärbar, wieso die Wirkung mit zunehmendem Scheitelabfluss ins Unendliche oder gegen einen Grenzwert tendieren sollte. In beiden Diagrammen (und den Residuenplots nicht dargestellt) sind kaum Unterschiede zwischen der Ausgleichskurve auf Basis der polynomischen Funktion (2. Grades) und der linearen Funktion zu erkennen. Da aus der Kausalkette zwischen Funktionsweise der Talsperren und mathematischer Abbildung als Funktion kein offensichtlicher Grund existiert, um von der zu Beginn formulierten Annahme abzuweichen, wurde im Projekt festgelegt, lineare Transformationsfunktionen für die Homogenisierung der HQ-Reihen an allen neun deutschen Elbepegeln zu verwenden.



Abbildung 11-3: Exemplarische Darstellung verschiedener Ausgleichsfunktionen zur Ableitung von Homogenisierungsvorschriften für Sommer- und Winterereignisse am Pegel Wittenberge

11.2.2 Differenzierung der Transformationsfunktionen

Wie im vorangegangenen Kapitel und Abbildung 11-3 bereits angedeutet, wurde im Zuge der Ermittlung der Transformationsfunktionen ebenfalls analysiert, ob und nach welchen Kriterien die abzuleitenden Funktionen für die Homogenisierung weiter differenziert werden müssen. Es liegt nahe, aufgrund jahreszeitlich unterschiedlicher Steuerungsmöglichkeiten der Talsperren (vgl. Kap. 2.4.2), eine Unterscheidung zwischen Transformationsfunktionen für

Sommer- und Winterereignisse durchzuführen. Basierend auf der Auswahl der modellierten Hochwasser (vgl. Kap. 5) ist es ebenfalls möglich, zwischen Ereignissen mit Schwerpunkten der Hochwasserentstehung im Moldau- bzw. im restlichen tschechischen Elbeeinzugsgebiet zu differenzieren. In Abhängigkeit welche Differenzierung gewählt wird, kommen pro Umrechnungsschritt zwischen zwei Gewässerzuständen nicht nur eine, sondern zwei oder sogar vier Funktionen zum Einsatz. Die Sensitivität unterschiedlicher Homogenisierungsvorschriften auf Verteilungsfunktionen / Ergebnisse der Extremwertstatistik wurde geprüft.

Abbildung 11-4 zeigt die Unterschiede in den nach gleichen Kriterien ermittelten "homogenen" Extremwertstatistiken für den Pegel Wittenberge (offizielle Daten (OD)), wenn entweder eine undifferenzierte (Variante D, 1 Funktion), eine nach Sommer- und Winterereignissen differenzierte (Variante C, 2 Funktionen) oder eine zusätzlich noch nach Entstehungsgebieten (Variante E, 4 Funktionen) unterteilte Homogenisierungsvorschrift zur Anwendung kommt. Dargestellt werden jeweils die HQ(T)-Werte sowie Differenzen der Varianten "D" und "E" zur favorisierten Option "C". Wie in der Einleitung zu Kapitel 11.2 beschrieben, wurden die HQ(T)-Werte für diese Voranalyse mittels eines vereinfachten Verfahrens berechnet, so dass die hier dargestellten Ergebnisse methodenbedingt nicht 1:1 mit den Resultaten in Kapitel 12 vergleichbar sind.



Abbildung 11-4: Ergebnisse extremwertstatistischer Berechnungen am Pegel Wittenberge für homogene HQ-Reihen, die mittels unterschiedlich stark differenzierter Transformationsfunktionen abgeleitet wurden (*bestangepasste Verteilungsfunktion war jeweils WB3/WGM*)

> Die Ergebnisse der Extremwertstatistik unterscheiden sich, abhängig davon, in welcher Differenzierung Transformationsfunktionen ermittelt werden, nur geringfügig. Die Differenzen liegen bis zu HQ₂₅ bei Werten \leq 30 m³/s, darüber bei maximal 50 m³/s und sind im Bezug zu den in Kapitel 12 beschriebenen Unsicherheiten der Extremwertstatistik als weniger bedeutend einzuschätzen. Somit gab nicht der mögliche Einfluss auf das Verfahren zur Bildung der Hochwasserstatistik den Ausschlag dafür, dass eine Unterscheidung zwischen Sommer- und Winterereignissen (bzw. zwischen den auf ihre HQ-Werte anzuwendenden Funktionen) durchgeführt wurde. Ausschlaggebend waren vielmehr praktische, datenbezogene Gründe: bspw. war für alle inhomogenen HQ-Werte ab 1890 ein jahreszeitlicher Bezug (zur Unterscheidung zwischen Sommer und Winter, vgl. Anlage 6) verhältnismäßig zweifelsfrei feststellbar, während die Zuordnung eines Einzugsgebietes - nicht nur aufgrund vielfach vorhandener Datenlücken in den hierfür benötigten Pegeldaten oder bereits erfolgter anthropogener Beeinflussungen der jeweiligen Messwerte - mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet wäre. Bei der gewählten Differenzierung in Funktionen für Sommer- und Winterereignisse kann zudem immer ein ausreichend großer Stichprobenumfang für die Ermittlung der Regressionsbeziehungen garantiert werden. Letzterer wäre bei einer vierfachen Differenzierung teilweise (vgl. Kap. 11.2.4) zu klein geworden.



Abbildung 11-5: Sommer-Winter-differenzierte Transformationsfunktionen für den Pegel Wittenberge zur Umrechnung vom Zustand "oS-oLi-oOr-oNe(1890)" in "mS-mLi-mOr-mNe(2013)"

Die Plausibilisierung der so ermittelten Transformationsfunktionen erbrachte sehr verlässliche Ergebnisse beim jeweiligen pegelbezogenen Vergleich. So verläuft für den Pegel Wittenberge die blaue Ausgleichsgerade (Winter) für die Homogenisierung vom Zustand "*oS-oLioOr-oNe(1890)*" in den Zustand "*mS-mLi-mOr-mNe(2013)*" in Abbildung 11-5 etwas flacher als die rote Gerade (Sommer) und bestätigt somit das Potential der Talsperren, größere Scheitelminderungen bei Winterereignissen hervorzurufen. Ursächlich hierfür ist u.a. die Möglichkeit, Talsperren mit ansteigender Schneedecke im Einzugsgebiet vorzuentleeren.

11.2.3 Bedeutung der Hochwasser 2002 und 2013 für die Ermittlung der Transformationsfunktionen

Die Ereignisse vom August 2002 und vom Juni 2013 stellen die bedeutendsten Hochwasser der jüngsten Vergangenheit im Elbegebiet dar. Trotz ihrer enormen Scheitelhöhe wurden für sie im Rahmen der hydraulischen Modellierung beträchtliche Scheitelreduktionen von mehreren 100 m³/s nachgewiesen (Abb. 11-2). Sie besitzen jedoch nicht nur aus diesem Blickwinkel eine Sonderstellung. Betrachtet man das Kollektiv der Sommerereignisse in Abbildung 11-5 (rote Symbole), dann zeigt sich die große "Lücke" von etwa 2.500 m³/s zwischen diesen beiden und den verbleibenden Ereignissen der Gruppe. In mathematischem Sinne könnten diese Hochwasser somit "Ausreißer" in ihrer Stichprobe darstellen und einer speziellen Behandlung bei der Ableitung von Transformationsfunktionen bedürfen.

Um dieser Frage nachgehen zu können, wurden im Rahmen der Voranalyse jeweils zwei Ausprägungen der in Kapitel 11.2.2 vorgestellten Varianten "C", "D" und "E" linearer Transformationsfunktionen aufgebaut. Sie unterscheiden sich lediglich darin, ob die beiden genannten Extremereignisse im zugrundeliegenden Stichprobenumfang berücksichtigt sind. Mit allen sechs Datensätzen für Transformationsfunktionen wurden anschließend homogene HQ-Reihen (1890-2013) für die Gewässerzustände "1890" und "2013" ermittelt, sowie darauf basierend extremwertstatistische Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sommer-/Winter-differenzierten Transformationsfunktionen am stabilsten gegenüber der Nicht-Berücksichtigung der Hochwasser 2002 und 2013 reagieren. Während sich für diesen Differenzierungstyp (Variante "C") bei statistischen Abflüssen bis zu HQ₂₀₀ Differenzen ≤ 40 m³/s zwischen den beiden Ausprägungen (mit/ohne Berücksichtigung der Ereignisse 2002 und 2013) ergeben, liegen die Unterschiede für die beiden Varianten "D" und "E" deutlich höher (bis zu 110 m³/s).

Außerdem war festzustellen, dass bei Nicht-Berücksichtigung der beiden extremen Ereignisse, eine Annäherung der Lage der Transformationsfunktionen für Sommer- und Winterereignisse stattfindet. In Abbildung 11-5 würde die rote Gerade beinahe identisch zur blauen Gerade verlaufen. Die aus Betriebsgründen der Talsperren gebotene jahreszeitliche Differenzierung würde sich somit nicht signifikant durchpausen. Eine Überschätzung der Talsperrenwirkung könnte dementsprechend nicht ausgeschlossen werden, wenn Sommerereignisse hin-

> sichtlich der Transformationsfunktionen wie Winterereignisse behandelt werden. Deshalb wurde im Projekt vereinbart, dass die beiden extremen Ereignisse der Jahre 2002 und 2013 in jedem Fall im Kollektiv der 30 Hochwasser zur Ableitung der Transformationsfunktionen verbleiben.

11.2.4 Unterscheidung zwischen "Ist-Zustand" und Zustand "2013"

Kapitel 11.1 beschreibt die auf den Modellierungsergebnissen (Kap. 10.2) basierende Festlegung zweier homogener Teilreihen im Zeitraum nach 1968. Anstatt alle Ereignisse dieses Zeitraums dem sogenannten "Ist-Zustand" zuzuordnen, werden die HQ-Werte ab 2003 dem Zustand "2013" zugerechnet. Bei der Homogenisierung in den Zustand "2013" müssen diese Hochwasser nicht mehr transformiert werden. Die Unterscheidung in zwei homogene Teilreihen hat auch zur Folge, dass ...

- ...aus dem Kollektiv der 30 simulierten Hochwasser 10 Ereignisse (ab Januar 2003), für die Ableitung der Transformationsfunktion "*mS-mLi-mOr-mNe(MOD)*" zu Zustand "*mS-mLi-mOr-mNe(2013)*" nicht mehr zur Verfügung stehen. Für sie wurde zwar der "Ist-Zustand" berechnet, er unterscheidet sich jedoch nicht vom Zustand "2013".
- ... bei Verwendung von nur noch 20 Hochwassern mit tatsächlich berechneten Unterschieden zwischen "Ist-Zustand" und Zustand "2013" eine realistischere Ableitung der benötigten Transformationsfunktion für die Umrechnung zwischen beiden Zuständen möglich ist.
- ... die HQ-Werte für das Jahr 2013, die verfahrens- und definitionsgemäß bereits im homogenen Zustand vorliegen, nicht transformiert werden. Dies wäre notwendig geworden, wenn keine Unterscheidung zwischen "Ist-Zustand" und Zustand "2013" vorgenommen worden wäre.

In diesem Zusammenhang wurde darüber hinaus festgelegt, dass die Homogenisierung der HQ-Werte des Jahres 2002 nicht durch Anwendung der Transformationsfunktionen, sondern auf Basis der für dieses Hochwasser originären Modellergebnisse (d. h. mit Hilfe der ermittelten Differenzen) erfolgen soll. Der Hochwasserablauf im Jahr 2002 war maßgeblich vom Versagensfall des Kraftwerksauslasses an der Talsperre Orlík geprägt; das Ereignis würde deshalb im Zustand "2013" mit einem höheren Scheitel (Kap. 10.2) ablaufen, was so nicht in den Homogenisierungsvorschriften abbildbar ist.

11.2.5 Zusammenfassung

Mit Bezug zu den verwendeten Daten und den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Untersuchungen und Festlegungen lassen sich die Transformationsfunktionen und das Vorgehen zu deren Ableitung im Projekt wie folgt charakterisieren:

- Die Homogenisierung erfolgt in den Zustand "*oS-oLi-oOr-oNe(1890)*" (ohne Talsperren) und den Zustand "*mS-mLi-mOr-mNe(2013)*" (mit Talsperren und heutiger Steuerung).
- Für jeden Pegel werden jeweils 5 Homogenisierungsvorschriften für die Transformation in einen der beiden zuvor genannten Zustände benötigt und abgeleitet.
- Die Homogenisierungsvorschriften bestehen aus unterschiedlichen Transformationsfunktionen für Sommerereignisse (01.05. - 31.10.) und Winterereignisse (1.11. -30.4.), so dass je Pegel und für 2 homogene Zustände insgesamt 20 Transformationsfunktionen zum Einsatz kommen (Anlage 5).
- Die Transformationsfunktionen basieren auf simulierten Scheitelabflüssen aus Modellsystemen, bei denen die eingetretenen Deichbrüche nicht berücksichtigt wurden. Dementsprechend werden die ermittelten Homogenisierungsvorschriften auch nicht auf das Hochwasser (bzw. die HQ-Werte) vom August 2002 angewendet; diese werden anhand der berechneten Modellergebnisse individuell korrigiert.
- Die Homogenisierungsvorschriften für die Umrechnung vom Ist-Zustand "*mS-mLi-mOr-mNe(MOD)*"in den Zustand "*mS-mLi-mOr-mNe(2013)*" werden nicht auf die HQ-Werte ab 2003 angewendet; diese befinden sich definitionsgemäß schon im homogenen Zustand "2013".
- Die Transformationsfunktionen werden durch lineare Gleichungen beschrieben, die auf alle HQ-Werte der jeweiligen Reihe anwendbar sind. Es wurde keine Untergrenze (bspw. < MHQ oder < MQ) für deren Anwendung auf inhomogene HQ-Werte festgelegt.
- Transformationsfunktionen beschreiben grundlegende hydrologische Zusammenhänge zwischen Wellenablauf und Scheitelbeeinflussung durch Talsperren und sind somit sowohl auf die inhomogenen HQ-Reihen auf Grundlage "offizieller Daten" (OD) als auch auf Basis der Projektdaten "WQ-Elbe 1890" (WQE) anwendbar.

Alle Transformationsfunktionen wurden nach dem gleichen Vorgehen ermittelt, sie sind jedoch für jeden Pegel unterschiedlich. Für die insgesamt neun Elbepegel mit inhomogenen HQ-Reihen wurden im Projekt somit insgesamt 180 Transformationsfunktionen aufgestellt. Sie sind in Anlage 5 mit ihrer Gleichung, dem ermittelten Bestimmtheitsmaß R² und der Angabe zum kleinsten und größten Wert (modellierter Scheitelabfluss) der für ihre Ermittlung genutzten Stichprobe aufgeführt.

11.3 Plausibilisierung der Transformationsfunktionen

Neben der individuellen Überprüfung der einzelnen Transformationsfunktionen anhand der Ermittlung des Bestimmtheitsmaßes R² und des visuellen Vergleichs der Verläufe der jeweiligen zustandsbezogenen Geraden für Sommer- und Winterereignisse (siehe Ausführungen zu Abb. 11-5) erfolgten zusätzlich weitere Prüf- und Plausibilisierungsschritte. Sie legten ihren Fokus auf die übergreifende Analyse für alle Transformationsfunktionen an einem Pegel bzw.

auf die pegelübergreifende, zustandsbezogene Bewertung von Transformationsfunktionen entlang der gesamten Elbe. Abbildung 11-6 zeigt alle für die Homogenisierung in den Zustand "2013" verwendeten Transformationsfunktionen für Winterereignisse am Pegel Wittenberge.



Abbildung 11-6: Übersicht über alle für die Homogenisierung in den Zustand "2013" verwendeten Transformationsfunktionen für Winterereignisse am Pegel Wittenberge

Die Winkelhalbierende symbolisiert die Situation, wenn eine fiktive Transformationsfunktion keine Veränderungen der HQ-Werte zur Folge hat. Es wird deutlich, dass ab einem "natürlichen" Abfluss (Abszisse) von > 1.000 m³/s alle abgebildeten Funktionen unterhalb der Winkelhalbierenden liegen. Dies bedeutet, dass durch den Talsperrenbetrieb Scheitelreduzierungen am Pegel Wittenberge hervorgerufen werden. Weiterhin lässt sich schlussfolgern, dass nur extrem kleine HQ-Werte im Bereich MQ durch die Transformation vergrößert werden (bspw. zurückzuführen auf die Vergleichmäßigung der Abflussverhältnisse durch Talsperren bei niedrigen und mittleren Abflüssen). Der Verlauf der Geraden untereinander zeigt die erwartete Stimmigkeit. So liegt die Transformationsfunktion für den Zustand "oS-oLi-oOr-oNe(1890)" zum Zustand "mS-mLi-mOr-mNe(2013)" am weitesten von der Winkelhalbierenden entfernt (d. h. größter Talsperreneffekt zwischen diesen beiden Zuständen), die Funktion für den Ist-Zustand "mS-mLi-mOr-mNe(MOD)" zu Zustand "mS-mLi-mOr-mNe(2013)" am engsten bei ihr (nur geringer Unterschied der Scheitelabflüsse zwischen den Zuständen).

Größere Abstände zwischen den zustandsbezogenen Transformationsfunktionen ergeben sich jeweils dann, wenn die Saale-Talsperren und die Talsperre Orlík in der Homogenisierungsvorschrift neu hinzukommen.

Im Vergleich zu Abbildung 11-6 zeigt die Darstellung der Transformationsfunktionen für Sommerereignisse in Abbildung 11-7 eine deutlich kleinere Spannweite zwischen den Funktionen auf, was auf die generell geringeren scheitelreduzierenden Einflüsse der Talsperren bei Sommerhochwassern zurückzuführen ist.



Abbildung 11-7: Übersicht über alle für die Homogenisierung in den Zustand "2013" verwendeten Transformationsfunktionen für Sommerereignisse am Pegel Wittenberge

Wertet man für verschiedene Elbepegel Funktionen für Transformationen zwischen gleichen Zuständen aus, so kann dies weitere Hinweise zur Plausibilität einzelner Funktionen und des Gesamtergebnisses geben. Es wird entlang der Elbe für die Pegel zwischen Dresden und Neu Darchau ebenfalls ein charakteristisches "Wandern" der Transformationsfunktionen hin zur Winkelhalbierenden erwartet, da die scheitelreduzierenden Wirkungen mit zunehmender Entfernung von den Talsperren i. d. R. abnehmen. Solch eine typische Entwicklung kann in Abbildung 11-8 für die Transformation vom Zustand "*oS-oLi-oOr-oNe(1890)*" in den Zustand "*mS-mLi-mOr-mNe(2013)*" für Winterereignisse nachvollzogen werden.



Abbildung 11-8: Übersicht über alle für die Homogenisierung vom Zustand 1890 in den Zustand 2013 verwendeten Transformationsfunktionen für Winterereignisse zwischen Dresden und Neu Darchau

Nicht immer zeigten die Funktionen für einzelne Transformationen die in Abbildung 11-6 bis 11-8 präsentierten typischen Verhaltensweisen. Dies kann hauptsächlich dann der Fall sein, wenn nur geringe Scheiteldifferenzen zwischen den umzurechnenden Zuständen vorzufinden sind. Weitergehende Analysen waren dann notwendig um zu verifizieren, wie viele HQ-Werte tatsächlich mit solchen Funktionen umgerechnet werden und ob daraus signifikante Auswirkungen auf die Werte der homogenen Reihen resultieren. Dies war i. d. R. nicht der Fall. Insgesamt zeigen die ermittelten Transformationsfunktionen aufgrund der vorgenommenen Plausibilisierungen sowohl pegelbezogen als auch pegelübergreifend sehr stimmige Ergebnisse, so dass die darauf basierende Homogenisierung der HQ-Reihen als sehr belastbar angesehen wird.

Abbildung 11-9 und 11-10 zeigen die für den Pegel Wittenberge (offizielle Daten (OD)) mittels Einsatz von 20 Transformationsfunktionen ermittelten homogenen HQ-Reihen für die Zustände "1890" und "2013". Der abgebildete Vergleich zwischen inhomogener und homogener, vollständig durch Talsperren beeinflusster Reihe in Abbildung 11-9 zeigt die bis zu mehr als -500 m³/s großen Reduktionen der HQ-Werte bei Homogenisierung in den Zustand "2013". Mit im zeitlichen Verlauf zunehmendem Talsperreneinfluss verringert sich die Korrektur der inhomogenen HQ-Werte. Deutlich wird die Erhöhung der Werte für einige kleine "Hochwasserereignisse" sowie im Jahr 2002 (vgl. Kap. 11.2.4). Gegenläufig verhalten sich die Ergebnisse für die Homogenisierung in den Zustand "1890" - hier erfahren die jüngeren HQ-Werte die größten Scheitelabflusserhöhungen, während alle Werte bis 1941 unverändert bleiben.



Abbildung 11-9: Inhomogene und homogene HQ-Reihe im Zustand "2013" für den Pegel Wittenberge (offizielle Daten (OD))



Abbildung 11-10: Inhomogene und homogene HQ-Reihe im Zustand "1890" für den Pegel Wittenberge (offizielle Daten (OD))

Die vollständigen Ergebnisse der Homogenisierung, d. h. die beiden zugrunde liegenden, inhomogenen HQ-Reihen (OD- und WQE-Daten), sowie die daraus resultierenden vier homogenen Reihen werden für die neun untersuchten deutschen Elbepegel in Anlage 5 dargestellt. Dort werden jeweils auch die jahreszeitliche Kategorisierung der HQ-Werte, die sich für gleiche Jahre zwischen den Pegeln unterscheiden kann, sowie der jeweils zugehörige "Gewässerzustand" entsprechend Tabelle 10-1 angegeben. Diese langen HQ-Reihen waren anschließend Ausgangspunkt für die im folgenden Kapitel vorgestellten extremwertstatistischen Berechnungen.

12 Extremwertstatistik für deutsche Elbepegel auf Basis inhomogener und homogenisierter HQ-Reihen (1890-2013)

Für die zwei in Kapitel 3.3 vorgestellten inhomogenen HQ-Reihen und die vier darauf aufbauenden, hinsichtlich der Talsperrenwirkung homogenisierten HQ-Reihen (siehe Kapitel 11 und Anlage 5) wurden abschließend extremwertstatistische Berechnungen durchgeführt. Vorgehensweise, Ergebnisse und deren Bewertung werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

12.1 Ausgangsdaten und ihre Homogenitätsprüfung

Alle untersuchten im Rahmen des Projektes zusammengestellten Stichproben, d. h. alle HQ-Reihen auf Grundlage der OD- und WQE-Daten (vgl. Kap. 3.3)

- im originären, inhomogenen Zustand,
- im Zustand "homogenisiert auf den Zustand der in der gesamten Bezugsperiode durchgängig wirkenden Talsperrenretention (Zustand 2013)"
- im Zustand "homogenisiert auf den Zustand ohne Talsperrenretention in der gesamten Bezugsperiode (Zustand 1890)"

wurden auf Trend, Bruchpunkte und Homogenität analysiert. Die der Homogenisierung vorausgehende Datenaufbereitung einschließlich Retentionsbereinigung wurde in Kapitel 3.3 dokumentiert. Darüber hinaus wurden nach der Homogenisierungsrechnung keine zusätzlichen Datenmodifikationen vorgenommen. Auch wenn in den homogenen HQ-Werten erneut eine HQ-Differenz zwischen Barby und Wittenberge > 300 m³/s zu finden war, erfolgt keine erneute Retentionsbereinigung, um eine diesbezügliche Doppelung zu vermeiden.

Nur bei Fehlen signifikanter Trends und Bruchpunkten sowie gegebener statistischer Homogenität ist eine Wahrscheinlichkeitsanalyse sinnvoll, was stets im Rahmen entsprechender Voruntersuchungen zu belegen ist. Der Begriff der Homogenität wird hier im statistischen Sinne verwendet und entspricht nicht exakt dem im Bericht weithin verwendeten Terminus einer hydrologischen Homogenität, welche sich auf das Vorhandensein abflussbezogen homogener, physikalisch identischer Rahmenbedingungen bezieht. Im Grundsatz sollten die Ergebnisse eines statistischen Homogenitätstests zwar stets die physikalischen Rahmenbedingungen reflektieren, je nach Datenqualität oder nach Sensitivität eines Test können aber hier Abweichungen auftreten. Dies ist z. B. in vorliegender Untersuchung der Fall, wie nachstehend dargestellt wird.

> Verwendet wurde eine Palette verschiedener verteilungsunabhängiger Testverfahren, jeweils auf einem Signifikanzniveau von 95 %. Dies geschah, um die Untersuchungsergebnisse durch Berücksichtigung unterschiedlicher Merkmale der Stichproben möglichst breit abzusichern. Im Einzelnen waren dies:

- **Kruskal-Wallis-2-Stichproben-Test** (KW2SP) zur Untersuchung der Identität der Mittelwerte zweier Teilstichproben;
- **Kruskal-Wallis-3-Stichproben-Test** (KW3SP) zur Untersuchung der Identität der Mittelwerte von drei Teilstichproben;
- **Cox-Stuart-Dispersions-Test** (COXDI) zur Untersuchung der Veränderung der Streuung einer Stichprobe;
- Kolmogorow-Smirnow-Test (KS) zur Untersuchung der Identität der Verteilungen zweier Teilstichproben;
- **Trendanalyse** (Minimierung der Fehlerquadratsumme, FQS) in Verbindung mit dem Mann-Kendall-Signifikanztest (MK) zur Identifizierung und Signifikanzabsicherung langfristig steigender oder fallender Tendenzen der Werte einer Zeitreihe;
- **Bruchpunktanalyse** (=**Sprunganalyse**) **nach Pettitt** zur Identifizierung signifikanter sprunghafter Veränderungen in einer Zeitreihe.

Im Ergebnis waren in allen Fällen (alle HQ-Reihen, alle Pegel) Trendfreiheit, Fehlen von Bruchpunkten und statistische Homogenität zu konstatieren. Tabelle 12-1 zeigt dies beispielhaft für die Untersuchung der OD-Stichproben; die übrigen Ergebnistabellen befinden sich in der Anlage 6. Dabei kommt die bereits erwähnte Möglichkeit, dass statistische Rechenergebnisse nicht notwendigerweise die physikalische Realität widerspiegeln, zum Tragen: Denn die OD-Serien, die in unterschiedlichen Zeiträumen zunehmende Retentionseffekte durch Bau und Betrieb von Talsperren enthalten, sind hydrologisch (physikalisch) nicht als einheitlicher Datensatz einzustufen. Aber offensichtlich sind die daraus resultierenden Unterschiede so gering, dass die verwendeten statistischen Tests diese nicht adäquat feststellen können.

Tabelle	12-1:	Untersuchungen	auf	Homogenität,	Trend	und	Sprung	(unveränderte	offizielle	Daten
OD, Tes	ts jewe	eils bei Signifikan	zniv	eau 95% / Bez	ugszeit	raum	1890-20	013)		

Pegel		Homogen	Trend	Sprung		
	KW2SP	KW3SP	COXDI	KS	MK/FQS	Petitt
Dresden	j	j	j	j	-/n	n
Torgau	j	j	j	j	-/n	n
Wittenberg	j	j	j	j	+/n	n
Aken	j	j	j	j	-/n	n
Barby	j	j	j	j	-/n	n
Magdeburg	j	j	j	j	+/n	n
Tangermünde	j	j	j	j	+/n	n
Wittenberge	j	j	j	j	+/n	n
Neu-Darchau	j	j	j	j	+/n	n

12.2 Extremwertanalyse

12.2.1 Verwendete Methodik

Die gewählte Vorgehensweise stützt sich auf die Vorgaben der einschlägigen Regelwerke DVWK (1999) und DWA (2012) und verwendete die *Software HQ-Ex 3.0.* Dabei erfolgte keine unreflektierte Übernahme automatisierter Softwareergebnisse. Wesentlich erschien vielmehr, die Wirkungsweise und Eigenarten der zur Verfügung stehenden Methoden zu beachten und diese im Hinblick auf die gegebene Aufgabe richtig einzusetzen. Dies gilt in vorliegendem Fall insbesondere für die Anpassungsprüfung: Mit Prüfkriterien wird versucht, die Anzahl der geeigneten Verteilungsfunktionen mit dazugehörigen Parameterschätzverfahren (VF/PS) einzugrenzen. Da die Anpassungstests relativ unscharf sind (vgl. hierzu z. B. KLUGE 1996), führen nur sehr deutliche Unterschiede der Prüfgrößen tatsächlich zur Ablehnung von Verteilungsfunktionen. Nichtsdestotrotz können diese Tests (allerdings stets in Kombination mit visueller Prüfung des "Fit") als Maß für die Güte der Anpassung genutzt werden.

Zur Prüfung der Anpassung werden in DVWK (1999) der Kolmogorov-Smirnov-, der n ω^2 und der Quantilkorrelations (rp)-Anpassungstest empfohlen; sie sind in der Software *HQ-Ex 3.0* implementiert. Wichtig ist aber lt. DVWK-Merkblatt in jedem Fall eine zusätzliche optische Kontrolle der Anpassung. Die von den Verteilungsfunktionen, den Prüfgrößen und dem optischen Test genutzten empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten werden nach verschiedenen Formeln berechnet. So benutzt das Programm *HQ-Ex 3.0* für die Plotting Position die Formel (*i*-0,4)/(*n*+0,2). Im n ω^2 -Test wird die Formel (*i*-0,5)/*n* und für den Kolmogorov-Smirnov-Test die Formel (*i*-1)/*n* verwendet. Alle diese Formeln sind völlig gleichwertig, es gibt kein Kriterium, nach dem einer Formel der Vorzug zu geben wäre, aber sie führen gerade im Bereich der hohen und niedrigen Wahrscheinlichkeiten zu unterschiedlichen Ergebnissen.

- Kolmogorov-Smirnov-Test (KS): Dieser Pr
 üfgr
 öße wird weniger Bedeutung beigemessen als den anderen Gr
 ößen, weil die gebildete maximale Wahrscheinlichkeitsdifferenz zwischen den empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten und den Werten der Verteilungsfunktion in der Regel im unteren oder mittleren Bereich der Verteilung auftritt, obwohl meist der obere Bereich interessiert (WASY 2005).
- $\mathbf{n}\omega^2$ -Test: Der $\mathbf{n}\omega^2$ -Wert als Summe der quadratischen Wahrscheinlichkeitsdifferenzen erfasst den Gesamtbereich der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten. Da aber ca. 90 % aller Stichprobenwerte im Bereich < HQ₂₀ liegen und die Wahrscheinlichkeitsdifferenzen im oberen Bereich nicht größer sind als im unteren Bereich, bewertet diese Prüfgröße vor allem die Anpassung im Bereich < HQ₂₀. Sie ist damit für die vorliegende Aufgabe, wo es nicht nur um Hochwasserstatistik für häufige, sondern auch für mittlere und seltene vorkommende Abflüsse geht, nicht voll geeignet.

> Quantilkorrelations-Test (rp): Im Gegensatz zu KS und nω² bezieht sich rp nicht auf Wahrscheinlichkeitsdifferenzen, sondern auf abflussbezogene Unterschiede. Konkret wird der Korrelationskoeffizient zwischen den Elementen der geordneten Stichprobe und den entsprechenden Quantilen der schmiegenden Verteilung berechnet. Da größere Differenzen in aller Regel bei den großen Ereignissen mit niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit, d. h. im oberen Bereich der schmiegenden Verteilungsfunktion auftreten, reagiert rp auch auf eine unbefriedigende Approximation in diesem Bereich. Im Hinblick auf die hier vorliegende Aufgabe ist diese Methode also gut geeignet.

Vor diesem Hintergrund erfolgte eine HQ-Analyse in mehreren Schritten, die nachfolgend beschrieben werden:

- 1. Zunächst wurden diejenigen Kombinationen VF/PS ermittelt, welche die besten numerischen Anpassungsergebnisse aufweisen. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf einem möglichst hohen rp. Allerdings darf der Bereich der kleineren HQ hierbei nicht vernachlässigt werden, denn auch für kleinere Ereignisse soll die schmiegende Verteilungsfunktion passen. Deshalb kamen nur solche VF/PS in Frage, bei denen nicht nur der rp möglichst hoch ist, sondern auch der n $\omega^2 < 0,1$ lag.
- Die schmiegenden Verteilungsfunktionen, die sich dergestalt aus den so numerisch "vorgefilterten" VF/PS ergaben, wurden im nächsten Schritt individuell und akribisch visuell geprüft. Der Fokus lag dabei auf Passgenauigkeit im "bemessungsrelevanten" Bereich von P 0,9 bis 0,99 (d. h. HQ₁₀ bis HQ₁₀₀) (vgl. Abb. 12-1).



Abbildung 12-1: Beispiel für die visuelle Prüfung der Anpassung mit Fokus auf den Bereich von P 0,9 bis 0,99 in HQ-Ex 3.0 (Pegel Wittenberge)

3. Für die dann bestangepasste VF/PS erfolgte sodann die Ermittlung der zugehörigen Konfidenzintervalle (Signifikanzniveau 95 %). Ziel war der Nachweis, dass möglichst alle berechneten empirischen Wahrscheinlichkeiten (plotting positions) zwischen den oberen und unteren Hüllkurven liegen (vgl. Abb. 12-2). Dabei erlaubt die Breite des Konfidenzintervalls den Befund über die Präzision der Schätzung: Je weiter die Hüllkurven auseinanderklaffen, desto höher die Variabilität und desto ungenauer die Berechnung. In Anlage 7 sind alle HQ(T)-Diagramme mit ausgewiesenen Konfidenzintervallen einsehbar.



Abbildung 12-2: Beispiel für die Überprüfung der Konfidenzintervalle der bestangepassten VF/PS

4. Als Plausibilisierungsschritt wurde anschließend geprüft, ob das hydrologisch zu erwartende Verhalten der HQ(T) für die unterschiedlichen Homogenisierungszustände (homogenisierter Zustand "1890" > inhomogener Zustand > homogenisierter Zustand "2013") tatsächlich vorliegt. Die Erwartung gründet sich darauf, dass die Abflüsse unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit für den "Zustand 1890", bei welchem keinerlei talsperrenbedingte Retentionseffekte vorhanden sind, stets am höchsten ausfallen müssten, gefolgt von denjenigen des inhomogenen Zustands. Die Abflüsse des "Zustands 2013", bei denen aufgrund der Annahme, dass über den ganzen Untersuchungszeitraum volle Talsperrenwirksamkeit besteht, sollten naturgemäß am niedrigsten ausfallen. Unstimmiges hydrologisches Verhalten wäre entweder bei Nichteinhaltung der o.g. "Größenordnungsregel" oder bei Kurvenverläufen, die sich bei größeren HQ(T) einander annähern, zu konstatieren. Abbildung 12-3 zeigt ein Beispiel für stimmiges Verhalten.



Abbildung 12-3: Pegelbezogener Vergleich der HQ(T) für 3 verschiedene Homogenisierungszustände

5. Um zu gewährleisten, dass auch die physikalisch begründeten hydrologischen Charakteristika zu den statistischen Ergebnissen passen, wurde weiterhin geprüft, ob die anhand einer bestimmten VF/PS jeweils berechneten HQ(T) auch im Längsprofil der Elbe plausibel sind (vgl. Abb. 12-4). Dies ist angesichts der in den Datengrundlagen, den Modellierungen aber auch der statistischen Anpassung einer schmiegenden Verteilung enthaltenen Unschärfe und Unsicherheiten ein weiterer wichtiger Punkt der Qualitäts- und Plausibilitätskontrolle.



Abbildung 12-4: Beispiel für den Abgleich der ermittelten HQ(T) im Längsprofil

In den Fällen, in denen die Schritte 2 bis 5 negative Resultate zeitigten, erfolgte eine entsprechende Analyse für die gemäß numerischer Anpassung nächstbeste VF/PS; ausgewählt wurde schließlich die jeweils günstigere Lösung.

12.2.2 Methodische Modifikation im Vergleich zu früheren Arbeiten

Im vorliegenden Bericht wurde bereits darauf hingewiesen, dass aus Vergleichbarkeitsgründen bei der Herleitung der statistischen Ergebnisse größtmögliche Kongruenz zur Vorgehensweise bei früheren Berechnungen, konkret im Zusammenhang mit dem Bericht BfG-1589 (BELZ ET AL. 2008) sowie dessen Aktualisierung (IKSE 2014) gewahrt werden sollte. Die hier verwendete, vorstehend erläuterte Methode ist de facto im Vergleich zu Bericht BfG-1589 prinzipiell identisch und entspricht dem dort als "DVWK-Regel" bezeichneten Verfahren (BELZ ET AL. 2008; aktualisiert in IKSE 2014). Gewisse Modifikationen waren allerdings nötig, um nicht plausible Ergebnisse zu vermeiden, wie sie sich beispielsweise …

• ... in hydrologisch unlogischem Verhältnis der Jährlichkeiten der unterschiedlichen Homogenisierungszustände untereinander einstellten. Ein Beispiel dafür ist der Verlauf der drei Jährlichkeitenkurven, die in Abb. 12-5 beispielhaft für den Pegel Barby dargestellt sind. Die Werte für den unhomogenisierten Zustand wurden mit gleicher VF/PS wie in Bericht BfG-1589 berechnet.



Abbildung 12-5: Vergleich der HQ(T) am Pegel Barby für drei verschiedene Homogenisierungszustände unter Verwendung der VF/PS in der Kombination WB3/MM (Datenbasis: OD)

• ... in teilweise hydrologisch widersprüchlichen Längsschnitten für Abflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten zeigten (vgl. Abb. 12-6). Hier treten nicht nachvollziehbare Widersprüche bezüglich der Höhe der Abflüsse unterschiedlicher Wiederkehrintervalle auf der Strecke Torgau - Wittenberg - Aken auf, gibt es Erklärungsbe-

> darf bezüglich der Abflussmehrung von Barby bis Tangermünde bei HQ₅₀ bis HQ₂₀₀ (der im Gegensatz zum Hochwasserwellenablauf bekannter großer Ereignisse steht und auch den Ablauf bei Jährlichkeiten < HQ₅₀ nicht fortsetzt) sowie im Verhalten der HQ-Werte am Pegel Neu Darchau.



Abbildung 12-6: Abgleich der ermittelten HQ(T) im Längsprofil unter Verwendung der VF/PS gemäß Bericht BfG-1589 für den jeweils unhomogenisierten Zustand (Datenbasis: OD) für die Pegel Dresden, Torgau, Barby, Wittenberge und Neu Darchau (Implausibilitäten markiert)

Es gibt mehrere Erklärungen für derartige hydrologische Implausibilitäten. Dazu gehören insbesondere ...

- ... der Umstand, dass in Bericht BfG-1589 (BELZ ET AL. 2008, fortgeführt durch IKSE 2014) letztlich fachlich nicht einvernehmliche, teilweise auch politisch begründete Entscheidungen bei den Pegeln von Barby bis Neu Darchau zum Tragen kamen, wodurch VF/PS präferiert wurden (WB3/MM statt WB3/WGM), die verfahrenstechnisch zwar akzeptabel waren, aber letztlich nicht den "best fit" darstellten.
- ... der Umstand, dass die HQ(T)-Werte der fünf "Hauptpegel" Dresden, Torgau, Wittenberge und Neu Darchau nun zusätzlich mit den Stationen Wittenberg, Aken, Magdeburg-Strombrücke und Tangermünde längsprofilbezogen im Sinne von Zusatzinformationen ergänzt wurden. Die gesamte Pegelkette galt es in hydrologisch widerspruchsfreien Einklang zu bringen.
- ... die mit jeder untersuchten Stichprobe unterschiedliche Anpassungscharakteristik der Verteilungsfunktionen.

Wichtigstes Instrument und gleichzeitig wesentliche Modifikation des hier verwendeten Verfahrens war die erfolgreich eingesetzte Detaillierung des visuellen Abgleichs – wie in Kapitel 12.2.1 beschrieben. Die hohe Qualität der erzielten Ergebnisse ist anhand der im Anlagenband beigefügten Diagramme der Verteilungsfunktionen unter Berücksichtigung der Konfidenzintervalle dokumentiert. Die Anwendung dieser Modifikation unter Inkaufnahme dessen, die Vergleichbarkeit "neuer" gegen "alter" Ergebnisse dadurch verringert wird, begründet sich daraus, dass die Forderung nach Vergleichbarkeit alleine nicht dazu führen darf, Ergebnisse zu produzieren, die der hydrologischen Logik widersprechen.

12.3 Ergebnisse der hochwasserstatistischen Analyse

Wie in Kapitel 11 dargestellt, wurden je nach Homogenisierungszustand (homogenisiert auf den Zustand "1890" ohne Talsperren / homogenisiert auf Zustand "2013" mit Talsperren / unhomogenisiert) für jeden Pegel Stichproben auf Basis der OD- und WQE-Serien gebildet. Damit bildeten pro Pegel sechs verschiedene Stichproben die Grundlage für die HQ-Statistik. Die Ergebnisse sind in den nachstehenden Tabellen 12-2 bis 12-7 zusammengestellt.

Dabei werden bewusst nicht die jeweiligen Ergebnisse für HQ(T) allein, sondern auch die zugehörigen oberen und unteren Hüllwerte der Konfidenzbereiche (synonym: Konfidenzintervall, Vertrauensintervall, Vertrauensbereich) wiedergegeben, um den zahlreichen Unsicherheiten bei der Herleitung dieser Werte Rechnung zu tragen. Angesichts des methodenimmanenten Schätzfehlers bei der Extremwertstatistik liegt der Abfluss einer jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit P mit gleicher Wahrscheinlichkeit bei jedem Punkt der innerhalb der Konfidenzgrenzen ausgewiesenen Spanne. Das bedeutet beispielsweise, dass der Abfluss 1.470 m³/s für HQ₂ am Pegel Dresden gleich wahrscheinlich ist wie ein Abfluss von 1.350 m³/s oder 1.590 m³/s (oberer und unterer Hüllwert, vgl. Tab. 12-2). Bei der angesetzten Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 geht die Annahme, dass das mit Hüllwerten auf dieser Lage berechnete Konfidenzintervall den gesuchten HQ(T) enthält, nur mit fünfprozentiger Wahrscheinlichkeit fehl. Anders ausgedrückt: Für das Intervall mit der ausgewiesenen Breite besteht eine Wahrscheinlichkeit von 95 %, den "wahren Wert" des HQ(T) abzudecken.

Die Abbildungen 12-7 (bezogen auf die OD-Ergebnisse) und 12-8 (bezogen auf die WQE-Ergebnisse) zeigen, dass sich die Talsperrensteuerung an den Pegeln in unterschiedlichem Maße auswirkt. Bei Einzelpegelbetrachtung ist die relative Talsperrenretentionswirkung (ausgedrückt in % vom natürlichen, unbeeinflussten HQ(T)-Wert des Zustands "1890") stets im Bereich von HQ₁₀ bis HQ₂₀ am größten. Im Längsprofil besteht zudem im Grundsatz eine Tendenz zu geringerer Talsperrenwirksamkeit mit zunehmender Entfernung des jeweiligen Pegels von den Speichern. Dieser Effekt verläuft jedoch nicht gleichmäßig und wird durch lokale Effekte, insbesondere Nebenflussmündungen sowie ab Barby durch den seinerseits stark durch Talsperren beeinflussten Saalezufluss, aufgeweicht.

	Verteilungs-		Wiederkehrintervalle (homogenisierte Reihe, Zustand 1890, offizielle Daten)									
Pegel	Anpassungs- methode		HQ ₂ 0,5	HQ₅ 0,8	HQ ₁₀ 0,9	HQ ₂₀ 0,95	HQ ₅₀ 0,98	HQ ₁₀₀ 0,99	HQ ₂₀₀ 0,995			
			[m%s]	[m%s]	[m%s]	[m%s]	[m%s]	[m%s]	[m%s]			
		unterer Hüllwert	1350	1940	2350	2780	3370	3860	4380			
Dresden	AE/WGM	HQ-Wert	14/0	2160	2670	3190	3930	4530	5180			
		oberer Hullwert	1590	2390	2980	3610	4490	5210	5980			
		unterer Hüllwert	1290	1910	2340	2780	3390	3870	4370			
Torgau	LN3/WGM	HQ-Wert	1410	2130	2660	3190	3940	4530	5150			
		oberer Hüllwert	1540	2360	2970	3610	4490	5190	5930			
		unterer Hüllwert	1220	1930	2410	2880	3480	3930	4370			
Wittenberg	P3/WGM	HQ-Wert	1350	2160	2740	3300	4020	4560	5090			
		oberer Hüllwert	1480	2390	3060	3710	4560	5190	5820			
	WB3/WGM	unterer Hüllwert	1510	2350	2880	3360	3940	4350	4740			
Aken		HQ-Wert	1660	2590	3180	3730	4390	4870	5320			
7401		oberer Hüllwert	1820	2820	3490	4100	4850	5390	5900			
	WB3/WGM	unterer Hüllwert	1850	2790	3350	3850	4440	4860	5250			
Barby		HQ-Wert	2020	3050	3670	4230	4900	5370	5820			
Barby		oberer Hüllwert	2200	3300	3990	4620	5370	5890	6390			
		unterer Hüllwert	1670	2530	3080	3580	4200	4640	5060			
Magdeburg	WB3/WGM	HQ-Wert	1820	2780	3410	3990	4700	5210	5700			
		oberer Hüllwert	1980	3040	3740	4400	5210	5790	6350			
		unterer Hüllwert	1680	2560	3090	3580	4160	4570	4960			
Tangermünde	WB3/MM	HQ-Wert	1840	2820	3440	4000	4680	5150	5610			
		oberer Hüllwert	2000	3090	3790	4420	5190	5740	6250			
		unterer Hüllwert	1820	2650	3150	3590	4120	4490	4840			
Wittenberge	WB3/WGM	HQ-Wert	1970	2880	3440	3940	4550	4970	5380			
Wittenberge		oberer Hüllwert	2120	3110	3740	4300	4980	5460	5910			
		unterer Hüllwert	1780	2570	3060	3500	4030	4400	4750			
Neu Darchau	WB3/WGM	HQ-Wert	1920	2800	3350	3850	4450	4880	5280			
		oberer Hüllwert	2070	3020	3640	4190	4880	5360	5820			

Tabelle 12-2: Resultate der statistischen Hochwasseranalyse für OD, homogenisiert auf Zustand 1890 ohne Talsperren (Konfidenzintervall 95 %, Bezugsperiode 1890-2013)

 Tabelle 12-3: Resultate der statistischen Hochwasseranalyse für OD, nicht homogenisiert (Konfidenzintervall 95 %, Bezugsperiode 1890-2013)

	Verteilungs-		Wiederkehrintervalle (inhomogene Reihe, offizielle Daten)									
Pegel	Anpassungs-		HQ₂	HQ₅	HQ ₁₀	HQ ₂₀	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀	HQ ₂₀₀			
	methode		0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995			
			[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]			
		unterer Hüllwert	1290	1850	2240	2640	3210	3680	4180			
Dresden	AE/MLM	HQ-Wert	1410	2060	2540	3030	3740	4310	4930			
		oberer Hüllwert	1530	2270	2830	3420	4260	4950	5690			
Torgau		unterer Hüllwert	1250	1830	2230	2630	3190	3630	4090			
	LN3/MLM	HQ-Wert	1370	2040	2530	3020	3700	4240	4810			
		oberer Hüllwert	1480	2250	2820	3410	4220	4860	5530			
	P3/WGM	unterer Hüllwert	1170	1830	2290	2740	3310	3750	4170			
Wittenberg		HQ-Wert	1290	2050	2600	3140	3830	4350	4870			
		oberer Hüllwert	1410	2270	2910	3530	4350	4960	5570			
Aken	WB3/WGM	unterer Hüllwert	1460	2270	2770	3230	3790	4190	4570			
		HQ-Wert	1610	2490	3060	3590	4230	4690	5130			
		oberer Hüllwert	1750	2720	3350	3940	4670	5190	5680			
	WB3/MLM	unterer Hüllwert	1820	2690	3210	3670	4220	4600	4960			
Barby		HQ-Wert	1980	2940	3520	4040	4660	5100	5510			
Darby		oberer Hüllwert	2150	3180	3830	4410	5100	5590	6050			
		unterer Hüllwert	1620	2420	2940	3410	3990	4400	4790			
Magdeburg	WB3/WGM	HQ-Wert	1760	2660	3240	3780	4450	4930	5390			
		oberer Hüllwert	1910	2890	3540	4160	4910	5450	5980			
		unterer Hüllwert	1620	2440	2950	3410	3970	4370	4740			
Tangermünde	WB3/MM	HQ-Wert	1770	2700	3280	3820	4470	4930	5370			
		oberer Hüllwert	1920	2950	3620	4230	4970	5500	6000			
		unterer Hüllwert	1770	2550	3020	3440	3940	4290	4620			
Wittenberge	WB3/WGM	HQ-Wert	1910	2770	3300	3770	4350	4750	5130			
vvicenberge		oberer Hüllwert	2060	2980	3580	4110	4760	5210	5640			
		unterer Hüllwert	1730	2480	2940	3350	3850	4200	4540			
Neu Darchau	WB3/WGM	HQ-Wert	1870	2690	3210	3680	4250	4650	5040			
		oberer Hüllwert	2000	2900	3480	4000	4650	5100	5540			
Verteilungs- funktion/			Wiederkehrintervalle (homogenisierte Reihe, Zustand 2013, offizielle Daten)									
---------------------------	------------------------	----------------------------	--	------------------------	-------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	----------------------------			
Pegel	Anpassungs- methode		HQ ₂ 0,5	HQ ₅ 0,8	HQ ₁₀ 0,9	HQ ₂₀ 0,95	HQ ₅₀ 0,98	HQ ₁₀₀ 0,99	HQ ₂₀₀ 0,995			
Dente	4544/014	unterer Hüllwert	1210	1670	1990	2330	2830	3250	3700			
Dresden	AE/WGM	oberer Hüllwert	1310	2070	2590	3150	3390	3940 4640	4550 5390			
		unterer Hüllwert	1190	1650	1990	2340	2860	3290	3770			
Torgau	AE/MLM	HQ-Wert oberer Hüllwert	1290 1390	1850 2060	2280 2580	2740 3140	3410 3960	3970 4650	4590 5410			
		unterer Hüllwert	1160	1680	2050	2420	2930	3340	3770			
Wittenberg	Vittenberg LN3/MLM	HQ-Wert	1260	1880	2330	2800	3440	3950	4480			
		oberer Hüllwert	1370	2080	2620	3170	3940	4550	5190			
	Aken P3/WGM	unterer Hüllwert	1410	2100	2550	2960	3490	3880	4260			
Aken		HQ-Wert	1540	2310	2830	3320	3930	4390	4830			
		oberer Hüllwert	1670	2520	3110	3670	4370	4900	5410			
	P3/WGM	unterer Hüllwert	1720	2480	2950	3390	3930	4320	4700			
Barby		HQ-Wert	1860	2700	3240	3740	4360	4820	5260			
		oberer Hüllwert	2010	2930	3530	4100	4800	5320	5820			
	P3/WGM	unterer Hüllwert	1570	2270	2730	3160	3710	4120	4520			
Magdeburg		HQ-Wert	1700	2490	3030	3540	4190	4670	5150			
		oberer Hullwert	1830	2/10	3330	3920	4670	5230	5780			
Terrerado	LN3/MM	unterer Hullwert	1600	2280	2720	3130	3670	4070	4470			
rangermunde		ng-wen	1/40	2010	3020	3010	4130	4010	5700			
		upterer Hüllwert	1700	2/40	3320	3000	4000	4000	3700			
Mittapharac	P3/M/CM		1950	2410	3110	3570	4140	4090	4440			
• • memberge	F 3/ VVGIVI	oberer Hüllwert	1990	2820	3380	3900	4550	5030	5490			
		unterer Hüllwert	1600	2340	2760	3160	3650	4010	4360			
Neu Darchau	P3/MLM	HQ-Wert	1810	2540	3020	3480	4050	4470	4880			
Nou Durchau	I GAMEIN	oberer Hüllwert	1930	2740	3280	3800	4450	4930	5390			

Tabelle 12-4: Resultate der statistischen Hochwasseranalyse für OD, homogenisiert auf den Zustand2013 (Konfidenzintervall 95 %, Bezugsperiode 1890-2013)

 Tabelle 12-5: Resultate der statistischen Hochwasseranalyse für WQE, homogenisiert auf Zustand

 1890 ohne Talsperren (Konfidenzintervall 95 %, Bezugsperiode 1890-2013)

	Verteilungs- funktion/		Wiederkehrintervalle (homogenisierte Reihe, Zustand 1890, Projektdaten WQE)							
Pegel	Anpassungs-		HQ₂	HQ₅	HQ ₁₀	HQ ₂₀	HQ₅0	HQ ₁₀₀	HQ ₂₀₀	
	methode		0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995	
			[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	
		unterer Hüllwert	1300	1890	2300	2710	3270	3730	4200	
Dresden	AE/WGM	HQ-Wert	1420	2110	2600	3100	3800	4360	4950	
		oberer Hüllwert	1540	2320	2900	3490	4320	4990	5690	
		unterer Hüllwert	1260	1850	2260	2660	3210	3650	4100	
Torgau	LN3/WGM	HQ-Wert	1380	2070	2560	3060	3740	4280	4840	
		oberer Hüllwert	1490	2280	2870	3460	4270	4910	5580	
	P3/WGM	unterer Hüllwert	1270	1880	2270	2640	3090	3430	3760	
Wittenberg		HQ-Wert	1380	2100	2570	3020	3580	3990	4400	
		oberer Hüllwert	1500	2320	2870	3400	4070	4560	5040	
	P3/WGM	unterer Hüllwert	1440	2140	2580	2980	3490	3860	4220	
Aken		HQ-Wert	1580	2370	2890	3370	3980	4430	4860	
		oberer Hüllwert	1710	2600	3200	3760	4470	5000	5500	
		unterer Hüllwert	1810	2630	3130	3580	4130	4520	4900	
Barby	P3/MM	HQ-Wert	1970	2880	3450	3960	4590	5050	5480	
		oberer Hüllwert	2140	3130	3760	4340	5060	5570	6070	
	WB3/MM (wackelig)	unterer Hüllwert	1770	2610	3090	3510	4010	4350	4670	
Magdeburg		HQ-Wert	1930	2850	3400	3890	4460	4850	5230	
		oberer Hüllwert	2090	3100	3710	4260	4910	5360	5780	
		unterer Hüllwert	1770	2630	3130	3570	4090	4440	4780	
Tangermünde	WB3/MLM	HQ-Wert	1940	2880	3450	3950	4550	4960	5350	
		oberer Hüllwert	2100	3140	3780	4340	5010	5480	5920	
		unterer Hüllwert	1800	2560	3010	3410	3880	4210	4530	
Wittenberge	WB3/WGM	HQ-Wert	1940	2780	3300	3760	4310	4700	5060	
		oberer Hüllwert	2080	3010	3590	4120	4750	5190	5600	
		unterer Hüllwert	1790	2450	2860	3230	3690	4020	4340	
Neu Darchau	AE/MM	HQ-Wert	1930	2660	3130	3560	4100	4480	4860	
		oberer Hüllwert	2060	2870	3400	3890	4500	4950	5380	

	Verteilungs- funktion/		Wiederkehrintervalle (inhomogene Reihe, Projektdaten WQE)							
Pegel	Anpassungs-		HQ ₂	HQ₅	HQ ₁₀	HQ ₂₀	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀	HQ ₂₀₀	
	methode		0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995	
			[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	
		unterer Hüllwert	1240	1810	2200	2590	3120	3540	3970	
Dresden	LN3/WGM	HQ-Wert	1350	2010	2480	2960	3600	4110	4640	
		oberer Hüllwert	1470	2220	2770	3320	4080	4680	5310	
		unterer Hüllwert	1200	1750	2140	2540	3090	3520	3980	
Torgau	LN3/WGM	HQ-Wert	1310	1960	2430	2910	3590	4120	4690	
		oberer Hüllwert	1420	2160	2710	3290	4090	4720	5400	
	P3/WGM	unterer Hüllwert	1220	1800	2170	2520	2960	3290	3600	
Wittenberg		HQ-Wert	1330	2000	2450	2870	3410	3800	4190	
2		oberer Hüllwert	1440	2200	2720	3220	3850	4320	4770	
Aken	P3/WGM	unterer Hüllwert	1390	2060	2480	2880	3370	3720	4070	
		HQ-Wert	1520	2280	2770	3240	3820	4250	4660	
		oberer Hüllwert	1650	2490	3060	3600	4270	4770	5250	
	WB3/WGM	unterer Hüllwert	1720	2540	3030	3470	3990	4360	4700	
Barby		HQ-Wert	1870	2780	3330	3830	4430	4850	5250	
		oberer Hüllwert	2020	3010	3630	4200	4870	5350	5800	
	WB3/WGM	unterer Hüllwert	1700	2490	2960	3380	3870	4220	4540	
Magdeburg		HQ-Wert	1850	2720	3250	3720	4290	4690	5060	
		oberer Hüllwert	1990	2940	3530	4070	4710	5150	5580	
	WB3/MM	unterer Hüllwert	1700	2500	2980	3400	3900	4240	4570	
Tangermünde		HQ-Wert	1850	2740	3280	3760	4340	4730	5110	
		oberer Hüllwert	2000	2980	3590	4130	4770	5220	5650	
		unterer Hüllwert	1760	2450	2870	3260	3740	4080	4420	
Wittenberge	P3/WGM	HQ-Wert	1890	2650	3140	3580	4140	4540	4930	
		oberer Hüllwert	2020	2860	3400	3910	4540	5000	5450	
		unterer Hüllwert	1740	2360	2750	3110	3560	3890	4220	
Neu Darchau	LN3/WGM	HQ-Wert	1860	2560	3000	3410	3940	4330	4710	
		oberer Hüllwert	1990	2750	3250	3720	4320	4760	5210	

Tabelle 12-6: Resultate der statistischen Hochwasseranalyse für WQE, nicht homogenisiert (Kon-
fidenzintervall 95 %, Bezugsperiode 1890-2013)

_

Tabelle 12-7: Resultate der statistischen Hochwasseranalyse für WQE, homogenisiert auf den Zustand2013 mit Talsperren (Konfidenzintervall 95 %, Bezugsperiode 1890-2013)

	Verteilungs-		Wiederkehrintervalle (homogenisierte Reihe, Zustand 2013, Projektdaten WQE)							
Pegel	Anpassungs-		HQ₂	HQ₅	HQ ₁₀	HQ ₂₀	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀	HQ ₂₀₀	
	methode		0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995	
			[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	
		unterer Hüllwert	1180	1630	1950	2270	2740	3120	3530	
Dresden	AE/WGM	HQ-Wert	1270	1830	2230	2660	3270	3770	4310	
		oberer Hüllwert	1370	2020	2520	3050	3800	4410	5080	
		unterer Hüllwert	1150	1600	1920	2250	2730	3130	3570	
Torgau	AE/WGM	HQ-Wert	1250	1800	2210	2640	3270	3800	4370	
		oberer Hüllwert	1340	1990	2490	3030	3810	4460	5180	
Wittenberg	LN3/MLM	unterer Hüllwert	1170	1640	1940	2240	2640	2940	3260	
		HQ-Wert	1270	1830	2220	2610	3120	3520	3930	
		oberer Hüllwert	1370	2030	2510	2980	3610	4100	4600	
	AE/MM	unterer Hüllwert	1350	1900	2260	2610	3080	3440	3810	
Aken		HQ-Wert	1470	2110	2550	2990	3580	4030	4500	
		oberer Hüllwert	1580	2320	2850	3370	4070	4620	5180	
	E1/MLM	unterer Hüllwert	1660	2320	2730	3130	3640	4020	4400	
Barby		HQ-Wert	1800	2530	3020	3490	4090	4550	5000	
		oberer Hüllwert	1930	2750	3310	3850	4550	5070	5600	
	P3/WGM	unterer Hüllwert	1640	2320	2740	3130	3610	3960	4300	
Magdeburg		HQ-Wert	1770	2540	3030	3490	4060	4480	4880	
		oberer Hüllwert	1900	2760	3320	3850	4510	4990	5460	
		unterer Hüllwert	1630	2330	2760	3160	3660	4020	4370	
Tangermünde	P3/MM	HQ-Wert	1770	2550	3050	3520	4100	4520	4940	
		oberer Hüllwert	1900	2770	3340	3880	4540	5030	5510	
Wittenberge		unterer Hüllwert	1710	2290	2670	3020	3470	3810	4150	
	E1/MLM	HQ-Wert	1830	2490	2920	3340	3880	4290	4690	
		oberer Hüllwert	1950	2690	3180	3670	4290	4760	5230	
		unterer Hüllwert	1680	2250	2610	2950	3390	3720	4050	
Neu Darchau	E1/WGM	HQ-Wert	1800	2440	2860	3270	3800	4190	4590	
		oberer Hüllwert	1910	2630	3120	3590	4210	4670	5130	



Abbildung 12-7: Ausmaß der Talsperrenretentionswirkung bei unterschiedlichen Hochwasserjährlichkeiten (in % des jeweiligen HQ(T)-Werts im Zustand "1890" ohne Talsperren, OD-Daten)



Abbildung 12-8: Ausmaß der Talsperrenretentionswirkung bei unterschiedlichen Hochwasserjährlichkeiten (in % des jeweiligen HQ(T)-Werts im Zustand "1890" ohne Talsperren, WQE-Daten)

12.4 Ergebnisanalyse und Bewertung

Die Abbildungen 12-9 und 12-10 zeigen die Resultate bezüglich der besonders relevanten HQ_{20} und HQ_{100} im Längsprofil der Elbe vor dem Hintergrund der aktuell gültigen abgestimmten Werte (letztere nur für die fünf "Hauptpegel" entsprechend BELZ ET AL. 2008 bzw. IKSE 2014). Auftretende Abweichungen zwischen den abgestimmten HQ(T)-Werten und den Resultaten für "OD" (nicht homogenisiert) gehen auf unterschiedliche mathematische Verteilungsanpassungen zurück.



Abbildung 12-9: Homogenisierungsdifferenzierte HQ(T) im Längsschnitt (Datenbasis: OD)



Abbildung 12-10: Homogenisierungsdifferenzierte HQ(T) im Längsschnitt (Datenbasis: WQE)

Deutlich zeigt sich dabei der angesichts der insgesamt kleineren HQ-Scheitel der WQE-Serien (vgl. Kap. 3.3) zu erwartende Effekt, dass entsprechend auch die HQ(T), die auf WQE-basierten Stichproben beruhen, niedriger liegen. Bei Betrachtung des "worst-case-Szenarios", d. h. Ablauf von Hochwasserwellen ohne regulierende Effekte der Talsperren (Homogenisierungszustand "1890"), wird deutlich, dass die bislang gültigen HQ(T)-Werte unter den auf OD-Daten beruhenden Resultaten liegen, ab Barby sogar in erheblichem Umfang. Die hier auf den ersten Blick verwundernden Ergebnisdifferenzen im Vergleich des Zustands "OD-nicht homogenisiert" zu den gültigen HQ(T)-Werten erklärt sich vor dem Hintergrund der nach Durchlaufen der Schritte 1. bis 4. bei der statistischen Analyse (vgl. Kap. 12.2.1) modifizierten VF/PS.

Dieses Phänomen verschiebt sich bei Evaluierung der auf WQE beruhenden HQ(T)-Werten; hier liegen die HQ₁₀₀ von Dresden und Torgau sogar leicht im "sicheren Bereich", der selbst bei völligem Versagen aller oberstrom liegenden Talsperren in hundertjähriger Eintrittswahrscheinlichkeit nicht erreicht wird. Ab der Saalemündung ändert sich dieses in moderatem Umfang. Insgesamt spiegeln die vorliegenden Unterschiede in den Ergebnissen die unterschiedliche Datenbasis wider, z. B. die in der Regel in den OD höher ausfallenden HQ(a) im Vergleich zu den WQE-Serien, sowie die in ähnlicher Größenordnung liegenden Änderungen zwischen den HQ(a)-Werten in der Homogenisierung auf Zustände "mit" und "ohne" Talsperrenwirkungen (vgl. Kap. 3.3 und Kap. 10 bzw. 11).



Abbildung 12-11: Vergleich der minutengenauen HQ mit den höchsten Tagesmitteln am Pegel Wittenberge (Zeitraum 1996 bis 2016)

In diesem Zusammenhang sind auch die Effekte der Verwendung unterschiedlicher Datenarten zu beachten: Bei den HQ-Serien "OD" handelt es sich zumeist um Mischserien. Der technische Fortschritt ermöglichte es zumeist erst ab Ende der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts (häufig sogar erst seit den 90er Jahren) minutengenau exakte HQ-Terminwerte (Kürzel: HQ) zu bestimmen und zu registrieren. Die Werte für frühere Jahre sind in aller Regel dann Tagesmittel (tQmax), zusammengesetzt aus unterschiedlich zusammengesetzten Terminwerten.

Abbildung 12-11 zeigt am Beispiel des Pegels Wittenberge, in welchem Umfang derartige Unterschiede auftreten. Der Zeitraum ab 1996 wurde gewählt, weil hier erst seit diesem Jahr minutengenaue HQ vorliegen. Es ergibt sich an dieser Station eine durchschnittliche Abweichung der Scheitelwerte um 1,5 %, die prinzipiell auch für frühere Zeiträume angenommen werden dürften. Tabelle 12-8 gibt für alle untersuchten Elbepegel die durchschnittlichen Abweichungen zwischen den jährlichen HQ und den tQmax an. Dabei liegen der Auswertung, je nach Datenverfügbarkeit, unterschiedliche Bezugszeiträume zugrunde; diese definieren sich entsprechend der gleichzeitigen Verfügbarkeit von HQ und tQmax seit Ende der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts.

Pegel	Bezugsperiode der Mittelung	Abweichung der HQ(a) von tQmax(a) [%]		
Dresden	1891-2016	3,0		
Torgau	1991-2016	2,5		
Wittenberg/L.	2000-2016	1,6		
Aken	1993-2016	1,3		
Barby	1998-2016	1,3		
Magdeburg-Strombrücke	1999-2016	1,4		
Tangermünde	1993-2016	1,0		
Wittenberge	1996-2014	1,5		
Neu Darchau	1993-2015	0,4		

 Tabelle 12-8: Mittlere Abweichung der j\u00e4hrlichen echten Scheitelwerte (HQ) von den j\u00e4hrlichen h\u00f6chsten Tagesmitteln (tQmax) an neun Elbepegeln

Die WQE-Daten sind ausnahmslos Tagesmittel (tQmax). Lediglich im Falle des Pegels Dresden stehen diesen bezüglich der OD seit dem Jahre 1891 echte Scheitelwerte (HQ) gegenüber. Näherungsweise (denn es besteht in der Hochwasserstatistik kein linearer Zusammenhang zwischen Ausgangsdaten und den HQ(T)-Ergebnissen), kann angesichts der mittleren Unterschreitung der HQ(a) angenommen werden, dass nur aufgrund der Datenart die Zielwerte bei den WQE-Ergebnissen hier um mindestens 3 % unterschätzt werden. Für die anderen Pegel, bei denen sehr viel weniger "echte" HQ-Scheitelwerte erhoben wurden, lässt sich dieser Differenzbetrag weniger gut abschätzen, zudem setzen sich die jeweiligen Mischserien zu unterschiedlichen Anteilen aus HQ(a) und tQmax(a) zusammen, wobei in der Regel die historischen echten Scheitelwerte unbekannt sind. Die in Tabelle 12-8 angegebenen Mittelwerte sind insofern als grobe Näherungswerte auf Basis der Verhältnisse der letzten Jahrzehnte zu verstehen.

12.5 Methodenkritik

Aus der abgestimmten Vorgehensweise, das Hauptaugenmerk auf Vergleichbarkeit der bestehenden HQ(T) zu den im Projekt neu errechneten Werten zu legen, ergaben sich im Längsschnittvergleich einige hydrologische Inkonsistenzen, am ausgeprägtesten am Pegel Wittenberg (vgl. Abb. 12-4 und 12-10). Grundsätzlich ist bekannt, dass sich Hochwasserwellen auf der Strecke zwischen Torgau und Wittenberg abflachen, wenn sich nicht aus der Schwarzen Elster nennenswerte Zuflüsse ergeben. Dies ist aber selten der Fall, denn die Schwarze Elster ist im Vergleich zu den anderen großen Nebenflüssen der Elbe einerseits recht abflussschwach (Pegel Löben: $HQ_{100}(1974/2005) = 135 \text{ m}^3/\text{s}$) und andererseits verfehlen ihre HW-Scheitel terminlich diejenigen der Elbe zumeist. In einer Untersuchung der BTU Cottbus (GRÜNEWALD ET AL. 2006) wird für die Verringerung des Scheitelabflusses von Dresden und Torgau bis Wittenberg der geringe Eindeichungsgrad im 19. und frühen 20. Jahrhundert verantwortlich gemacht, gepaart mit Retentionseffekten im Mündungsbereich der Schwarzen Elster. Insofern darf in der Hochwasserstatistik auch keine nennenswerte Erhöhung der HQ(T) zwischen den beiden Pegeln Torgau und Wittenberg erwartet werden.

In der Hochwasserstatistik auf Basis der "WQE" ergaben sich zwischen Torgau und Wittenberg bei kleineren und mittleren Ereignissen bis einschließlich HQ₅₀ (die naturgemäß weniger durch Retentionseffekte beeinflusst werden) folgerichtig nur minimale, dabei in der Tendenz sich abflachende Unterschiede. Bei großen Ereignissen (> HQ_{100}) allerdings traten auffällig große Verringerungen von Torgau nach Wittenberg auf, welche beispielsweise im Falle der nicht homogenisierten HQ-Serien, bezogen auf das Niveau von HQ₁₀₀, rd. 8 % betragen (Δ =320 m³/s). Als mögliche Erklärung dafür wurde der Gesichtspunkt der im Stromverlauf unvollständigen Retentionsbereinigung des Ereignisses 1890 untersucht. Die seinerzeitige Bund-Länder-Arbeitsgruppe, welche den Bericht BfG-1589 (BELZ ET AL. 2008) erstellte, sah sich im Rahmen ihrer Bearbeitung nicht in der Lage, ein vollständiges Inventar der Deichbrüche einschließlich der Quantifizierung ihrer scheitelmindernden Effekte für die untersuchten Pegel aufzustellen. Recherchen des LHW Sachsen-Anhalt (GORECZKA ET AL. 2007) konnten in diesem Zusammenhang aus den ausgewerteten Unterlagen für das Jahr 1890 signifikante Auswirkungen durch Deichbrüche auf den Hochwasserablauf dokumentieren. Diese Deichbrüche lagen sowohl stromauf als auch stromab des Pegels Torgau. Dementsprechend erfolgten über die obligatorische Anwendung der "BTU-Formel" (vgl. BELZ ET AL. 2008) hinausgehende gesonderte Bereinigungen nur für das Jahr 1890 und zwar nur am Pegel Torgau, obwohl aber Folgewirkungen stromab dieses Pegels hydraulisch-hydrologisch sinnhaft wären. Grund für diese isolierte Bereinigung war, dass die auf Torgau nachfolgenden Pegel Wittenberg und Aken wegen Datenmängeln aus den hochwasserstatistischen Untersuchungen herausgenommen worden waren und am Pegel Barby lt. Abschätzung des LHW in der Folge nur Effekte in der vernachlässigbaren Höhe von 50 m³/s (d. h. rd. 1,3 % des gemessenen Scheitelabflusses) eingetreten sein sollen. Ab Barby wurde dann der Bereinigungsansatz der

> "BTU-Faustformel" verwendet, der allerdings die zwischen Barby und Wittenberge liegenden Pegel Magdeburg-Strombrücke und Tangermünde nicht berücksichtigt. Damit erfolgte für das Hochwasser 1890 an den Pegeln der Elbe eine lückenhafte Bereinigung von deichbruchbedingten Retentionseffekten. Demzufolge ist anzunehmen, dass die HQ-Scheitelwerte für dieses bedeutende Ereignis für Wittenberg, Aken, Barby, Magdeburg-Strombrücke und Tangermünde hingegen in geringerer Höhe in die Rechnung eingingen, als die hydraulischhydrologische Logik gebieten würde. Entsprechend resultieren daraus für diese Pegel geringere HQ(T), als mit Bereinigung zu erwarten wären.

> Die stark vereinfachte Plausibilisierung dieser Überlegungen erfolgte mangels belastbarer eigener Analyseinstrumentarien (Modelle) für dieses historische Ereignis für die Pegel Torgau, Wittenberg, Aken und Barby unter Rückgriff auf den Ansatz und die Ergebnisse von HELMS ET AL. (2016B). Dieser Ansatz besitzt gemäß den Erläuterungen in Kapitel 3.3 seine größten Unsicherheiten im Bereich stromab der Saalemündung; stromauf der Saale erscheint er deutlich plausibler. Im Anschluss ab Barby konnte unverändert der BTU-Ansatz verwendet werden, allerdings unter Einbezug möglicher Retentionseffekte nicht allein in Bezug auf Wittenberge und Neu Darchau, sondern zur Vervollständigung auch erweitert auf die zwischenliegenden Pegel. Dies geschah in grober Vereinfachung als Interpolation, d. h. bei Ereignissen, bei denen die Jahreshöchstabflüsse am Pegel Wittenberge zu denen des Pegels Barby eine Differenz von mehr als 300 m³/s aufweisen, wird für den Pegel Magdeburg-Strombrücke (=HQ(Barby)- $100m^{3}/s$) eingesetzt und für den Pegel Tangermünde (=HQ(Barby)- $200m^{3}/s$). Tabelle 12-9 zeigt anhand des Beispiels der WQE-Zahlen die in die Stichproben eingehenden modifizierten Scheitelwerte für 1890.

	HQ (WQE)	HQ (WQE)
Pegel	gemäß Kap. 3.3	mit zusätzlicher Retentions-
	$[m^3/s]$	korrektur [<i>m³/s</i>]
Dresden	3.810	3.810
Torgau	3.540	3.540
Wittenberg/L.	2.920	3.400
Aken	3.100	3.650
Barby	3.150	3.630
Magdeburg	3.140	3.530
Tangermünde	3.220	3.430
Wittenberge	2.850	3.330
Neu Darchau	2.680	3.160

Tabelle 12-9: Deichbruchbezogene Retentionskorrekturen für das Ereignis 1890 an den Elbepegeln im Vergleich zu unmodifizierten Werten, Datenbasis WQE (Farben: weiß - unmodifizierter Wert, blau – nach HELMS ET AL. (2016B) modifiziert, gelb – nach BTU-Cottbus-Formel modifiziert)

Das Ergebnis zeigt in Gegenüberstellung zu den HQ(T)-Werten gemäß Vorgehen in Kapitel 3.3 einen HQ(T)-Längsschnitt (Abb. 12-12), der erwartungsgemäß vor allem bei den selteneren Eintrittswahrscheinlichkeiten größere Abflüsse ausweist als ohne Deichbruchkorrekturen; gleichzeitig fällt die fragwürdige Abflachung zwischen Torgau und Wittenberg deutlich geringer aus. Auch verschwindet die zwar schwache, nichtsdestotrotz hydrologisch schwer erklärbare Abflussmehrung zwischen Magdeburg und Tangermünde. Offensichtlich führt eine Retentionsbereinigung für eingetretene Deichbrüche bereits bei den hier angewandten Annahmen und Vereinfachungen grundsätzlich zu einem plausibleren Ergebnis.



Abbildung 12-12: Pegelbezogene HQ(T) entlang der Elbe bei Modifikation der Ausgangsdaten gemäß Tabelle 12-9 unter Verwendung von retentionsbereinigten HQ-Werten für das Jahr 1890 (oben) und demgegenüber unmodifizierten HQ-Werten (unten)

Zur Erlangung der Anwendungsreife für diesen Ansatz fehlen allerdings weitergehende Untersuchungen zur physikalischen Beweisführung und exakteren Quantifizierung. Darüber hinaus ist, über die ohnehin schon sehr aufwändigen bisherigen Recherchen (GORECZKA ET AL. 2007, HELMS ET AL. 2016B) hinaus, zusätzliche historische Quellensuche und -auswertung erforderlich, ergeben sich doch bereits aus diesen beiden Berichten heraus sub-

stanzielle Diskrepanzen: Die Retentionseffekte beim Ereignis 1890 bis zum Pegel Barby werden von Letzteren erheblich höher angegeben als von GORECZKA ET AL. (2007). Auch die Aussagen zur Lokalisation der Deichbrüche und zu weiteren deichbruchbeeinflussten Hochwasserereignissen weichen stark voneinander ab; z. B. stellen HELMS ET AL. (2016B) fest, dass die in 1890 aufgetretenen Deichschäden in den Folgejahren offenbar noch nicht hinreichend ausgebessert waren, so dass es bei größeren Hochwasserereignissen der Jahre 1891, 1895, 1896 und 1900 erneut zu Retentionseffekten kam, die in den Scheitelbereichen und deren Folgetagen in der Abflussganglinie erkennbar sind.

Als Fazit und gleichzeitig einstimmiges Votum der eingesetzten FGG-Expertengruppe bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass eine Retentionsbereinigung für eingetretene Deichbrüche grundsätzlich zu stichhaltigeren Ergebnissen bei der Hochwasserstatistik führen würde. Allerdings wären zur Erhärtung zusätzlich vertiefende, umfangreiche Untersuchungen unabdingbar. Dazu wäre allerdings ein Ressourcenaufwand erforderlich, der den im Arbeitsauftrag vorgegebenen Umfang und Zeitrahmen des Projekts sprengen würde und zukünftigen Anstrengungen überlassen werden muss.

12.6 Schlussfolgerungen

Ziel des Projektes war es, unter Einsatz mathematischer Abflussmodelle und Anwendung homogenisierter HQ-Reihen eine verbesserte Hochwasserstatistik für Elbepegel in Deutschland zu ermitteln. Außerdem sollte mit den abschließenden extremwertstatistischen Berechnungen die Belastbarkeit der bestehenden HQ(T)-Werte an der Elbe geprüft werden, indem unterschiedliche, talsperrenbedingte Retentionsannahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Hochwasserstatistik untersucht wurden. Dabei wurde in Ergänzung zu den bestehenden offiziellen Daten (OD) zusätzlich Grundlagendaten auf Basis des BfG-Projektes "WQ-Elbe 1890" (HELMS ET AL. 2016B) einbezogen. Da letztere als deutlich zuverlässiger angesehen werden, empfiehlt sich bei Bewertung der vorgelegten Ergebnisse (u. a. Vergleich zur derzeit gültigen Statistik) die Fokussierung auf die auf WQE-Grundlage berechneten Ergebnisse. Die Bewertung wird im Folgenden anhand der Abflüsse für HQ₁₀₀ durchgeführt.

Auch ohne Berücksichtigung der geringen Effekte der unterschiedlichen Datenarten (die WQE-Daten basieren im Gegensatz zu den OD-Werten und den bisherigen HQ(T)-Werten ausnahmslos auf Tagesmitteln) fallen WQE-Ausgangszahlen und die WQE-basierten Ergebnisse (lange HQ-Reihen / Extremwertstatistik) niedriger aus als die bestehenden abgestimmten HQ(T)-Werte. Grundsätzlich ist festzustellen, dass sich die hydrologische Datenqualität an der Elbe zwar mit WQE deutlich verbessert hat und die hochwasserbeeinflussende Wirkung der Talsperrensteuerung in Tschechien und Thüringen mit Abschluss des vorliegenden Projekts nun belastbar quantifiziert wurde. Dennoch verbleiben in Bezug auf weitere, mehr oder weniger stark die Scheitelabflüsse beeinflussende Faktoren, noch große Unsicherheiten. Diese beziehen sich ...

- ... auf den Umfang der Wirkung der Vorlandverbuschung auf den großräumigen Hochwasserwellenablauf, der den durchgeführten Sensitivitätsbetrachtungen zufolge zwar eher gering ausfällt aber ggf. vorhanden ist;
- ... auf den Umfang der Wirkung der Änderungen der Vorlandtopographie, oft in Gestalt von Auflandungen, welcher gegeben ist, aber zu seiner Quantifizierung angesichts seiner heterogenen Topographie noch viel Forschungsarbeit erfordert;
- ... auf den Umfang der Wirkung der Verringerung der Überflutungsflächen, die sich mit dem hier realisierbaren Forschungsansatz nur abschätzen, aber nicht im für eine Homogenisierung notwendigen Umfang quantifizieren ließen,
- ... auf den Umfang der Wirkung der ungesteuerten Retention infolge von Deichbrüchen bei historischen Ereignissen, welche erhebliche Auswirkungen auf Datenbasis und Hochwasserstatistik haben dürften.

Aus diesen Gründen sind mit Abschluss des vorliegenden Forschungsprojektes zwar erhebliche Fortschritte beim Thema Hochwasserhydrologie der Elbe erzielt worden, gleichzeitig wurde aber im Sinne der zuvor genannten Punkte Anlass zu weiterer Forschungsarbeit konstatiert. Die bestehenden Unsicherheiten sind insofern derzeit nur unzureichend zu quantifizieren.



Abbildung 12-13: Homogenisierungsdifferenzierte HQ₁₀₀ im Längsprofil (Datenbasis: WQE)

Im Hinblick auf Bemessungsfragestellungen hilfreich ist in diesem Zusammenhang die Beachtung der Ergebnisse der Untersuchung der jeweiligen Konfidenzbereiche der jeweiligen HQ(T) (vgl. Kap. 12.3 mitsamt Tab. 12-5, 12-6 und 12-7), die bezogen auf das HQ_{100} im

Längsprofil in Abbildung 12-13 zusammenfassend dargestellt sind. Im Einzelnen werden in Abbildung 12-13 die folgenden Ergebnisse statistischer Berechnungen gezeigt:

- HQ₁₀₀ auf Grundlage der nicht homogenisierten Daten (WQE),
- HQ₁₀₀ für die beiden Homogenisierungszustände "1890" und "2013" (WQE),
- die oberen Hüllwerte für HQ₁₀₀ im Homogenisierungszustand "1890" (WQE),
- die aktuell in den Bundesländern gültigen, abgestimmten HQ₁₀₀-Werte (OD) sowie
- das Vertrauensintervall mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit auf Grundlage der HQ₁₀₀-Werte der nicht homogenisierten Daten (WQE).

Letzt genanntes Vertrauensintervall wurde dabei auf Grundlage der nicht homogenisierten Datenbasis (WQE) berechnet, da diese Daten unabhängig von extremen Szenarien die aktuelle Realität widerspiegeln. Es zeigt die Spanne an, innerhalb derer für jeden Pegel das HQ₁₀₀ auf Grundlage der nicht homogenisierten Daten mit gleicher Gewissheit erwartet werden kann. Die Abbildung zeigt, dass in diesem Vertrauensbereich alle HQ₁₀₀ der unterschiedlichen Homogenisierungszustände liegen, aber auch die derzeit abgestimmten HQ₁₀₀-Werte.

Bezogen auf die aktuell abgestimmten HQ_{100} -Werte lässt sich ablesen, dass an der Oberen Elbe und der oberen Mittelelbe sogar die erhöhten Abflüsse aus dem extremen Szenario "was wäre, wenn keine Talsperren in Tschechien und Thüringen in der Bezugsperiode eingerichtet worden wären" abgedeckt werden. Im weiteren Stromverlauf liegen die HQ_{100} -Werte dann nahe an den Resultaten auf Basis der unhomogenisierten Datenserien.

Beachtet man die oberen Hüllwerte der Ergebnisse des Zustands "1890" ("ohne Talsperren"), Abbildung 12-13, erhält man eine Vorstellung darüber, mit welch hohem Abflussniveau (bezogen auf HQ₁₀₀) entlang der Elbe im Extremfall gerechnet werden kann – und im Umkehrschluss, welche vorteilhafte Wirkung die Talsperren Tschechiens und Thüringens auf die Hochwasserintensitäten entlang der Elbe ausüben. Insbesondere an der Oberen Elbe in Deutschland, wo der Einfluss der tschechischen Talsperren am größten ist, zeigen die Ergebnisse, dass mit den derzeit geltenden HQ(T)-Werten auf der Zustand ohne Talsperren abgedeckt ist. Hieraus allerdings eine "überschätzte" Bemessung abzuleiten, liegt nach den Erfahrungen der letzten schweren Hochwasser fern. Letztlich zeigen die vorgelegten Untersuchungen erneut deutlich, dass die kritische Beurteilung der statistischen Datengrundlagen und die Plausibilisierung im Längsschnitt von hoher Bedeutung sind.

13 Perspektiven und Empfehlungen

Die FGG Elbe und die BfG haben im Jahr 2013 im Rahmen einer Kooperation das Projekt "Homogenisierung von HQ-Reihen (1890-2013)" gestartet, um eine verbesserte Datengrundlage für extremwertstatistische Berechnungen an den Pegeln der deutschen Binnenelbe zu schaffen. Nach Abschluss aller Untersuchungen liegen nun belastbare, umfangreiche Erkenntnisse zu den überregionalen Wirkungen der tschechischen und thüringischen Talsperren auf Hochwasserscheitelabflüsse an der Elbe vor. Diese mündeten in - bezüglich der Talsperrenwirkung - homogenisierten langen HQ-Reihen (1890-2013) und darauf aufbauend in aktualisierten extremwertstatistischen Berechnungen für neun Elbepegel zwischen Dresden und Neu Darchau. Durch Talsperrenbetrieb beeinflusste, physikalisch inhomogene HQ-Reihen, sowohl auf Basis offizieller Abflusskurven der WSV als auch aus dem vom KIT bearbeiteten Projekt "W-Q Elbe 1890" bildeten vereinbarungsgemäß den Ausgangspunkt der statistischen Untersuchungen.

Mit Vorlage des Abschlussberichts endet ein Projekt, das an der Elbe - nicht nur aufgrund neuer Zahlen für die Hochwasserstatistik - einen enormen Erkenntniszuwachs beförderte. Diesen gilt es nun für weitergehende Nutzungen verfügbar zu machen und darüber hinaus im Projekt neu erkannten Untersuchungsbedarf zu definieren und diesem Bedarf durch geeignete Folgeuntersuchungen nachzukommen. Dergestalt kann langfristig und nachhaltig ein Mehrwert (nicht nur) für die Hochwasserhydrologie an der Elbe, sondern auch in grundlegender methodischer Hinsicht geschaffen werden. Aus diesen Gründen empfehlen die Autoren der vorliegenden Studie folgende weiteren Schritte:

- Die Klärung darüber, welche Rolle die neuen im Projekt "WQ-Elbe 1890" ermittelten hydrologischen Grundlagen vergangener Zeiträume (Abflusskurven, tQ-Reihen, lange HQ-Reihen) zukünftig für allgemeine wasserwirtschaftliche und hochwasserspezifische Fragestellungen spielen sollen, wird als eine der primären Notwendigkeiten angesehen. Hierzu bedarf es einer einvernehmlichen Sichtweise aller Akteure aus der WSV, den Bundesländern und der Wissenschaft. Die Meinungsbildung über die Bedeutung dieser gewässerkundlichen Grundlagen sollte im Idealfall aus rein fachlichhydrologischen Gesichtspunkten erfolgen; aufwands- und nutzungsbezogene Aspekte dürfen dabei nur eine untergeordnete Rolle spielen.
- Solch ein Vorgehen wirft somit zunächst die Frage nach dem Grad der erzielten Qualitätsverbesserung in den Datengrundlagen auf und betrifft aus Sicht der BfG die gesamte Bandbreite, beginnend bei den W-Q-Beziehungen über die Quantifizierungen von Retentionseffekten, Eindeichungswirkungen sowie Struktur- und Vegetationsän-

> derungsfolgen, bis hin zu neuen homogenen HQ-Reihen und der darauf basierenden Extremwertstatistik. Dieser Diskussionsprozess ist noch nicht abgeschlossen. Fest steht beispielsweise, dass nach wie vor nur Abschätzungen zu den Auswirkungen der seit 1890 vorgenommenen Eindeichungen an der Elbe und in den Mündungsbereichen ihrer Nebenflüssen vorliegen. Da diese in ihrer Gesamtheit Auswirkungen auf Hochwasserscheitel der Elbe besitzen, sollten schrittweise weitere Anstrengungen unternommen werden, um die vorliegenden historischen Datensätze zu ergänzen bzw. zu konsolidieren und nachfolgend mittels großräumiger hydraulischer Modelle für diesbezügliche Wirkungsnachweise in Wert zu setzen. Bestehende Unsicherheiten - auch im Hinblick auf die Wirkung der ungesteuerten Retention infolge von Deichbrüchen bei historischen Ereignissen, welche erhebliche Auswirkungen auf die hydrologische Datenbasis und die Hochwasserstatistik haben dürften - könnten damit beseitigt werden.

- Im Sinne der internationalen Abstimmung wäre es darüber hinaus wünschenswert, die in Tschechien und Deutschland angewandten Verfahren zur Homogenisierung von HQ-Reihen in einem Vergleich gegenüber zu stellen. Dieser sollte zuvorderst nicht mit dem Ziel der Identifikation des "geeigneteren" Verfahrens erfolgen, sondern dient vielmehr der Vertiefung des im vorliegenden Projekt begonnenen Wissenstransfers und kann zu einer Harmonisierung führen, die in vielfacher Weise die Bewältigung hochwasserspezifischer Aufgabenstellungen unterstützen kann. Es sollte grundsätzlich darauf geachtet werden, dass keine widersprüchlichen Abflussbilanzen zwischen benachbarten Pegeln an der Grenze zwischen Tschechien und Deutschland im Längsprofil der Elbe entstehen.
- Mit Hilfe der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist es möglich, gemeinsam mit den Pegelbetreibern einen Diskurs zu starten, um die erforderlichen Entscheidungen zum weiteren Vorgehen auf eine breite, fachliche Basis zu stellen; beispielsweise drängt sich die Frage auf, ob die gegenwärtig gültigen Elbeabflüsse für Bemessungszwecke zu überprüfen und ggf. anzupassen sind. Ein offen geführter und transparenter Diskussionsprozess sollte hinsichtlich der Nachnutzung dieser Grundlagendaten initiiert und geführt werden.

Abschließend soll betont werden, dass es im vorgestellten Projekt mit großem Aufwand gelungen ist, für 30 charakteristische Hochwasserereignisse an der Elbe und für die mündungsnächsten Pegel der maßgebenden Zuflüsse die benötigten hochaufgelösten Abflussganglinien zu beschaffen und diese für die großräumige Abflussmodellierung im internationalen Elbegebiet bereitzustellen. Ohne solche grundlegenden Daten (und die damit verknüpften Erkenntniszugewinne) gibt es keine Untersuchungen. Zumindest aus wissenschaftlicher Sicht sollten deshalb weitere Anstrengungen in die Erhebung historischer, topografischer und hydrologischer Daten unternommen werden. Es bestehen berechtigte Hoffnungen, dass ein erweiterter

und verbesserter Modelleinsatz zu einem besseren Gesamtsystemverständnis um anthropogene Beeinflussungen des Hochwasserablaufs an der Elbe und zu besseren hydrologischen Grundlagendaten für Elbepegel führen wird. Bundesanstalt für Gewässerkunde

> Bericht BfG-1938

14 Zusammenfassung

In der Vergangenheit wurden in verschiedenen Untersuchungen erhebliche Defizite in den hydrologischen Grundlagendaten für Pegel an der Elbe in Deutschland festgestellt. Diese äußerten sich hauptsächlich in mängelbehafteten Abflusskurven, widersprüchlichen Abflussbilanzen zwischen benachbarten Pegeln und missverständlichen Abflussentwicklungen im Längsprofil der Elbe. Zur Behebung dieser Defizite wurde 2006 das BfG-Projekt "W-O-Elbe 1890" aufgelegt (Auftragnehmer: Karlsruher Institut für Technologie, KIT). Ein weiteres Problem wurde erst im EU-INTERREG-Projekt "LABEL" (2009-2012) durch die Ergebnisse von großräumigen Simulationen mit Abflussmodellen des tschechischen Instituts für Wasserforschung (VÚV TGM) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) offensichtlich. Die eingesetzten Modelle ermittelten aufgrund des Betriebs von tschechischen und thüringischen Talsperren erhebliche Scheitelreduzierungen (mehrere Dezimeter) für die bedeutenden Hochwasser von 2002, 2006, 2011 und 2013 entlang der gesamten deutschen Binnenelbe. Neben diesem positiven Effekt für den Hochwasserschutz der Unterlieger in Deutschland, verursachte die sukzessive Inbetriebnahme von Talsperren im deutschen und tschechischen Elbegebiet seit 1932 diesbezüglich allerdings auch eine nicht zu vernachlässigende physikalische Inhomogenität in den langen HQ-Reihen (1890-2013) der Elbepegel. Aufgrund unterschiedlich großer Talsperrenvolumina (und dementsprechend unterschiedlich großer Wirkungen bei vergleichbaren Hochwassern) in verschiedenen Teilzeiträumen zwischen 1890 und 2013 waren diese Reihen für die Ermittlung der Extremwertstatistik an Elbepegeln immer in Diskussion.

Nach Abschluss der Arbeiten des KIT im Projekt "W-Q Elbe 1890" stehen seit 2015 erheblich verbesserte historische Abflusskurven (einheitlich für den Zeitraum 1890-2006) für die deutschen Elbepegel zur Verfügung, sodass sich nunmehr stimmigere Abflussbilanzen zwischen Pegeln berechnen lassen. Das Problem um inhomogene lange HQ-Reihen wird durch die Anwendung der neuen Kurven indes noch nicht gelöst. Deshalb schlossen die Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) und die BfG im Mai 2013 einen Kooperationsvertrag mit dem Ziel der "Homogenisierung von HQ-Reihen (1890-2013)" für deutsche Elbepegel ab (später erweitert auf den Zeitraum bis 2013). Mit dem vorliegenden Bericht BfG-1938 werden die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens bereitgestellt, welches von deutschen und tschechischen Experten begleitet wurde. In sieben Sitzungen dieser internationalen Expertengruppe, zwei Sitzungen der deutschen Untergruppe und zahlreichen Workshops der tschechischen und deutschen Modellierer erfolgten alle erforderlichen Abstimmungen zu den vorgenommenen hydraulisch-statistischen Berechnungen.

> Wie bereits in den im Jahr 2006 veröffentlichten tschechischen Untersuchungen zur Homogenisierung von HQ-Reihen für Pegel an der Moldau und der Elbe in Tschechien, bilden hydraulische Modelle für verschiedene Gewässerzustände ohne und mit Talsperren den Kern des mehrere Arbeitsschritte umfassenden Verfahrens zur Homogenisierung der HO-Reihen für deutsche Elbepegel. Im Unterschied zum Vorgehen in Tschechien, bei denen jedes in den HQ-Reihen enthaltene Hochwasser mittels Modelleinsatz in einen Zustand mit bzw. ohne Talsperren umgerechnet werden musste, wurde im Projekt von FGG Elbe und BfG für die hydraulischen Berechnungen lediglich eine Auswahl von 30 charakteristischen Elbehochwassern zwischen 1970 und 2013 herangezogen. Nur diese Ereignisse wurden mit den verfügbaren deutsch-tschechischen Modellsystemen in den historischen Gewässerzustand ohne Talsperren ("1890"), den heutigen Gewässerzustand mit Talsperren ("2013") sowie weitere relevante Zwischenzustände umgerechnet. Der hiermit verfolgte Homogenisierungsansatz basiert auf dem Vorgehen der "Internationalen Hochwasserstudienkommission" am Rhein aus den 1970er Jahren. Damals wurden die durch den Oberrheinausbau verursachten Inhomogenitäten in den langen HQ-Reihen der Rheinpegel Maxau und Worms auf diese Art und Weise bereinigt. Dieser Methode folgend, wurden auf Basis der modellierten, zustandsbezogenen Scheitelabflüsse für das Kollektiv der Hochwasser zunächst Transformationsvorschriften erstellt, mit deren Hilfe dann die nicht modellierten Scheitelabflüsse (HQ-Werte) zwischen 1890 und 2013 zur Erzeugung langer homogener HQ-Reihen ohne ("1890") und mit heutiger Talsperrenwirkung ("2013") umgerechnet wurden.

> Zur Durchführung der hydraulischen Berechnungen mit den deutsch-tschechischen Modellsystemen für Moldau, Eger, Elbe und Saale wurden mit großem Aufwand an der Elbe und für die mündungsnächsten Pegel der maßgebenden Zuflüsse die benötigten hochaufgelösten Wasserstands- und Abflussganglinien für die 30 modellierten Hochwasserereignisse beschafft bzw. generiert und plausibilisiert. Dieses Kollektiv steht nun für weitere Projekte zur großräumigen Abflussmodellierung im internationalen Elbegebiet zur Verfügung.

> Die Ergebnisse der hydraulischen Berechnungen bestätigen die früheren Ergebnisse für die Hochwasser von 2002, 2006, 2011 und 2013. Durch den Betrieb von Talsperren für Hochwasserrückhaltezwecke bei den Oberliegern in Tschechien und Thüringen profitieren die von Hochwasser der Elbe betroffenen Unterlieger entlang der deutschen Binnenelbe in erheblichem Maße. Ereignisabhängige Scheitelabflussreduzierungen bis zu 800 m³/s wurden für deutsche Elbepegel ermittelt.

Über die Talsperrenwirkung hinausgehende Einflüsse anthropogener Maßnahmen im deutschen Teil des Elbelaufs (u.a. der Verlust von natürlichen Überschwemmungsgebieten durch Eindeichungen an der Elbe und Bau von Absperrbauwerken an Nebenflussmündungen) wurden im Rahmen des Projekts exemplarisch abgeschätzt. Die im Expertenkreis und in Publikationen aus den 1980er- und 1990er-Jahren geäußerten Vermutungen zu den gegenläufigen Effekten von im Oberlauf der Elbe geschaffenen Talsperrenvolumina und den im Unterlauf verlorenen Rückhalteräumen konnten aufgezeigt werden; ebenso wurde bestätigt, dass der Verlust von natürlichen Retentionsräumen Auswirkungen in einer Größenordnung von mehreren 100 m³/s auf die Scheitel großer Hochwasser (Abflusserhöhung) hervorrufen kann. Da sich mit dem vorliegenden Modellinstrumentarium die Wirkungen jedoch nur abschätzen, aber nicht exakt quantifizieren ließen, wurden diese Effekte bei der Erzeugung homogener HQ-Reihen nicht berücksichtigt.

Die modellierten, zustandsbezogenen Scheitelabflüsse für die 30 ausgewählten Hochwasser bildeten den Ausgangspunkt zur Formulierung von Transformationsfunktionen zur Umrechnung der "inhomogenen" HQ-Werte in die homogenen Zustände "1890" und "2013". Die verwendeten Umrechnungsvorschriften sind linear, unterscheiden zwischen Sommer- und Winterereignissen und beschreiben grundlegende hydrologische Zusammenhänge zwischen Wellenablauf und Scheitelbeeinflussung durch Talsperren. Alle Transformationsfunktionen wurden nach dem gleichen regressionsbasierten Vorgehen ermittelt, sie sind jedoch für jeden Pegel unterschiedlich. Für die insgesamt neun Elbepegel mit inhomogenen HQ-Reihen wurden im Projekt insgesamt 180 Transformationsfunktionen aufgestellt und angewendet.

Auf Beschluss der projektbegleitenden Expertengruppe vom November 2016 waren die inhomogenen HQ-Reihen sowohl auf Basis der offiziell gültigen Abflusskurven (OD) als auch auf Basis der im Projekt "W-Q-Elbe 1890" erarbeiteten, verbesserten neuen Abflusskurven (WQE) zusammenzustellen, um darauf aufbauend jeweils homogenisierte Reihen ohne ("1890") und mit Talsperren ("2013") zu generieren. Insgesamt wurden den abschließenden extremwertstatistischen Berechnungen somit 6 HQ-Reihen (2 inhomogene, 4 homogenisierte Reihen) für jeden Pegel zugeführt. Die ermittelten Ergebnisse für die Extremwertstatistik wurden sowohl nach numerisch-statistischen Kriterien als auch pegelbezogen und im Längsschnitt der Elbe hinsichtlich ihres hydrologisch zu erwartenden Verhaltens plausibilisiert.

Auch die Ergebnisse der Extremwertstatistik belegen, dass überregionale Auswirkungen der Talsperren auf die Hochwasserscheitel von häufigen, mittleren und seltenen Hochwassern der Elbe zu erwarten sind, die weit über Obere Elbe und obere Mittelelbe hinausreichen. Entsprechende Scheitelreduzierungen (berechnet als Differenz zwischen den HQ(T)-Werten mit/ohne Talsperreneinfluss) können in Abhängigkeit von Jährlichkeit und Pegelstandort bis zu mehreren 100 m³/s betragen. Die relative scheitelreduzierende Wirkung der Talsperren (ausgedrückt in % vom natürlichen, unbeeinflussten HQ(T)-Wert des Zustands "1890") ist stets im Bereich von HQ₁₀ bis HQ₂₀ am größten, sie nimmt im Längsprofil der Elbe mit zunehmender Entfernung des Pegels bzw. des Wirkraums von den Speichern ab.

Bei der Auswertung der extremwertstatistischen Ergebnisse (lange HQ-Reihen / Extremwertstatistik), die auf Basis der (homogenen) HQ-Reihen für die offiziellen Daten der WSV (OD)

und auf Basis der Ergebnisse des Projekts "W-Q Elbe 1890" (WQE) ermittelt wurden, wird deutlich, dass die WQE-basierten statistischen Extremwerte in der Regel deutlich niedriger ausfallen. Differenzen zwischen WQE- und OD-Daten können in ähnlichen Größenordnungen liegen wie zwischen "homogenen" und "inhomogenen" HQ(T)-Werten. Zur Einordnung und Bewertung der statistischen Ergebnisse ist in diesem Zusammenhang auch von Bedeutung, dass die statistischen Scheitelabflussreduzierungen in der Größenordnung der Konfidenzintervalle (Signifikanzniveau 95 %) bei gleicher Wahrscheinlichkeit liegen.

Abschließend wird festgestellt, dass durch die erfolgreiche Zusammenarbeit von Institutionen des Bundes, der Länder, Tschechiens und der IKSE nunmehr homogenisierte HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren vorliegen. Auf deren Basis lässt sich deutlich fundierter als bisher eine aktualisierte Hochwasserstatistik für deutsche Elbepegel gründen. Mit Abschluss des Projekts konnten darüber hinaus erhebliche Fortschritte beim Thema Hochwasserhydrologie der Elbe erzielt werden, die nun weiteren Forschungs- und Abstimmungsbedarf zur Folge haben. Die Autoren der Studie empfehlen, noch bestehende Unsicherheiten in den jetzt vorliegenden HQ-Reihen (v.a. hinsichtlich historischen Deichbrüchen und der Wirkung seit 1890 verloren gegangener Überschwemmungsflächen) mittelfristig mit weiter verbesserten Modellen (auf Basis von neu geschaffenen und rekonstruierten hydrologischen sowie morphologischen Grundlagendaten) zu eliminieren. Im Rahmen der internationalen Abstimmung wird es als zielführend angesehen, die Vorgehensweisen zur Homogenisierung von HQ-Reihen in Deutschland und Tschechien parallel dazu zu harmonisieren. Um die nach fachlichhydrologischen Gesichtspunkten ermittelten Projektergebnisse zeitnah einer nachhaltigen Nutzung (bspw. für Planungszwecke) verfügbar machen zu können, ist es nondig zusammen mit Pegelbetreibern und Stakeholdern einen offenen und transparenten Prozess zur Klärung der Rolle der Daten aus dem "W-Q Elbe 1890"-Projekt sowie aus der vorliegenden Arbeit in der wasserwirtschaftlichen Praxis herbeizuführen.

Die hiermit endenden Arbeiten aufgrund eines Kooperationsvertrags zwischen den FGG Elbe und der BfG ist ein Beleg, wie Elbeanliegerländer, WSV und BfG mit Einsatz hydraulischer Modelle partnerschaftlich hydrologische Grundlagen für Elbepegel verbessert haben.

15 Literatur

- AQUALOGIC CONSULTING (2011): AquaLog theory and reference manual (*unveröffentlicht*)
- BALVÍN, P., KREJČÍ, J. (2017): Homogenisation Project (2013-2016). Interner Projektabschlussbericht zur Beauftragung durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (*unveröffentlicht*)
- BELZ, J.-U., ILSE, J., OPPERMANN, R. (2008): Hochwasserstatistik für ausgewählte Elbepegel. BfG-Bericht 1589. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (1999): Einfluss der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein. BfG-Bericht 1221. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2002): Das Augusthochwasser 2002 im Elbegebiet. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2002A): Einfluss der Landnutzung und der Ausbaumaßnahmen auf den Hochwasserablauf im Rhein. BfG-Bericht 1363. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2008): Auswertung digitaler Fernerkundungsaufnahmen des Elbe-Wasserlaufes (Datenauswertung Elbe). BfG-Bericht 1580. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2009): Einheitliche Grundlage für die Festlegung der Bemessungswasserspiegellage der Elbe auf der frei fließenden Strecke in Deutschland. BfG-Bericht 1650. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2011): Ermittlung des Einflusses der Flutung der Havelniederung auf Hochwasser an der Elbe im Bereich des HQ₁₀₀. BfG-Bericht 1726. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2012): Bewertung von Einflüssen tschechischer und thüringer Talsperren auf Hochwasser an Moldau und Elbe in Tschechien und Deutschland mittels Einsatz mathematischer Modelle. BfG-Bericht 1725. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2013): Wirkungen von Deichbrüchen, von gesteuerten und ungesteuerten bestehenden Rückhaltungen sowie von geplanten Maßnahmen auf das Hochwasser im Mai/Juni 2013 an der Elbe. Kurzbericht im Auftrag des BMUB. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (unveröffentlicht)

- BFG (2013A): Ermittlung der Bemessungszuflüsse BHQ1 und BHQ2 nach DIN 19700 für die Diemeltalsperre. 2. Teilbericht. BfG-Bericht 1735. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse. BfG-Mitteilungen Nr. 31. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2015): 2D-Modellierung der Unteren Mittelelbe zwischen Wittenberge und Geestacht. BfG-Bericht 1848. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG (2017): Ad-hoc-Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms. Teilberichte 1 und 2.
 BfG-Bericht 1833. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BFG; FGG ELBE (2013): Vorhabensbeschreibung zum Projekt "Homogenisierung der langen HQ-Reihen (1890-2012) für deutsche Elbepegel". Koblenz, Magdeburg: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Flussgebietsgemeinschaft Elbe (unveröffentlicht)
- BJÖRNSEN BERATENDE INGENIEURE (2009): Erstellung des eindimensionalen Feststofftransportmodells für die Elbe. Dokumentation des hydraulischen Modells. Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (*unveröffentlicht*)
- BKG (2017): Digitale Orthophotos DOP DE und Topografische Karte DTK 25 (Web Map Service) des Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (*abgerufen im Jahr 2017*)
- BUREK, P. (2008): Analyse des Wellenablaufs beim Hochwasser 2002 an der Elbe. BfG-Bericht 1587, Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BUSCH, N., HATZ, M., PROMNY, M., HAMMER, M. (2016): Aus der Vergangenheit lernen, für die Zukunft vorbereitet sein – 10 Jahre hydrodynamische Abflussmodellierung der BfG zur Verbesserung hydrologischer Grundlagen an der Binnenelbe. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 37/16. Beitrag zum Tag der Hydrologie am 17./18. März 2016 in Koblenz.
- DGJ (2013): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbruch. Elbegebiet. Teil I Von der Grenze zur CR bis zur Havelmündung 2013. Magdeburg: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, H. 251. Bonn: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau
- DWA (2008): Erschließung und Einbeziehung historischer Informationen für die Ermittlung extremer Hochwasserabflüsse. Fallbeispiele und Empfehlungen. DWA-Themen, Mai 2008. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Merkblatt DWA-M 552. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall

DWD (2013): Das Hochwasser an Elbe und Donau im Juni 2013. Berichte des DWD Nr. 242. Offenbach: Deutsches Wetterdienst. *Im Internet unter: https://www.dwd.de/DE/presse/hintergrundberichte/2013/Hochwasser_Juni2013_PDF* .pdf?__blob=publicationFile&v=3 (abgerufen im Januar 2018)

- DYCK, S. (1980): Angewandte Hydrologie, Teil 1. Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse. 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen
- ELBSTROMBAUVERWALTUNG (1898): Der Elbstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse. 3 Textbände, Atlas und Tabellenband. Königliche Elbstrombauverwaltung zu Magdeburg. Berlin: Reimer Verlag
- ELBSTROMBAUVERWALTUNG (1902): Generelles Regulierungsprojekt des Hochwasserbettes der Elbe. Erläuterungsbericht und überschlägliche Kostenberechnung. Königliche Elbstrombauverwaltung zu Magdeburg. Berlin: Reimer Verlag
- ELLEDER, L. (2010): Historické extrémní případy povodní v povodí Labe a Vltavy. Stand 01.01.2012. Im Internet unter: http://web.natur.cuni.cz/geografie/vzgr/monografie/povodne/povodne_elleder.pdf (abgerufen im Januar 2018)
- ENGEL, H. (1997): Die Ursachen der Hochwasser am Rhein natürlich oder selbstgemacht? In: IMMENDORF, R. (1997) (HRSG.): Hochwasser. Natur im Überfluss? 1. Auflage. Heidelberg: C.F. Müller Verlag
- GORECZKA, F., ROSE, J. (2007): Betrachtung der Deichbruchwirkungen auf die Hochwasserabflüsse oberhalb Barby in der Reihe 1890-2006. Magdeburg: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
- GRAFE, M., HEILAND, P., KÜHL, A. (2010): Das INTERREG IV B-Projekt "LABEL Adaptation to flood risk in the LABE-ELBE river basin". Berichtsreihe des Forums zur Europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie. Band 2. Tagungsband zur 2. Veranstaltung am 17. Juni 2010 in Kaiserslautern. Seite 99-1012
- GRÜNEWALD, U., BARTL, S., SCHÜMBERG, S. (2006): Studie zur Ableitung von Hochwasserbemessungswerten im deutschen Binnen-Elberaum insbesondere für den Pegel Wittenberge. Cottbus: BTU (*unveröffentlicht*)
- HAUPT, R., LIESE, C., HALBING, F., WOLF, M. (2015): Hochwasserabflusskennwerte f
 ür die Saale von der Quelle bis zur M
 ündung. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 59.2015. Seite 282-284
- HELMS, M., MIKOVEC, R. & IHRINGER, J. (2013): Verbesserung der hydrologischen Datengrundlage an der Elbe: Das Projekt W-Q Elbe 1890. In: Tagungsband zum BfG-Kolloquium "Wissen was war… - Rückblick auf hydrologische Extremereignisse" am 16./17.10.2012 in Koblenz, S. 14-22.

- HELMS, M., BELZ, J.-U. (2016A): Rekonstruktion von Abflusskurven und täglichen Abflussreihen der deutschen Elbepegel im Zeitraum 1890-2006. In: OHLIG, C. (HRSG.): 150 Jahre Elbstrombauverwaltung. Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft (DWhG) e. V., Band 26, S. 107-134
- HELMS, M., IHRINGER, J., MIKOVEC, R. (2016B): Überarbeitung der Abflussreihen und Abflusstafeln für die Elbe (Zeitraum 1890-2006). Unveröffentlichter Entwurf des Endberichts im Auftrag der BfG. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (*unveröffentlicht*)
- HLADNÝ, J., KRÁTKÁ, M., KAŠPÁREK, L. (2004): August 2002 catastrophic flood in the Czech Republic. Prag: T.G. Masaryk Institut für Wasserforschung
- HSK (1978): Schlussbericht der Hochwasserstudienkommission (HSK) für den Rhein: Ergebnisse über die Hochwasser und ihre Entwicklungen von Beginn der Aufzeichnungen an, die Einflüsse des Ausbaus des Rheins, seiner Nebenflüsse und der Seen auf das Hochwasser, den derzeitigen Stand des Hochwasserschutzes sowie Empfehlungen für Maßnahmen gegen die vergrößerte Hochwassergefahr. Bonn: Bundesministerium für Verkehr
- IKSE (1996): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet. Magdeburg: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (*unveröffentlicht*)
- IKSE (2004): Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe. Magdeburg: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
- IKSE (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Ein geografisch, hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. Magdeburg: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
- IKSE (2007): Hydrologische Auswertung des Frühjahrshochwassers 2006 im Einzugsgebiet der Elbe. Magdeburg: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
- IKSE (2009): Zweiter Bericht über die Erfüllung des Aktionsplans Hochwasserschutz Elbe im Zeitraum 2006 bis 2008. Magdeburg: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
- IKSE (2012): Abschlussbericht über die Erfüllung des "Aktionsplans Hochwasserschutz Elbe" (2003-2011). Magdeburg: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
- IKSE (2014): Hydrologische Auswertung des Hochwassers vom Juni 2013 im Einzugsgebiet der Elbe. Magdeburg: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
- ISO 1100/2 (1998): Fließmessung in offenen Gerinnen Teil 2: Bestimmung des Wasserstands-Abfluss-Verhältnisses (ISO 1100-2: 1998)

- KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ, O., JENÍČEK, M., BUCHTELA, Š. (2006): Influence of large reservoirs in the Elbe River basin on reduction of flood flows, ISBN 80-85900-60-2. Prag: T.G. Masaryk Institut für Wasserforschung
- KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ, O., HANEL, M., HORÁČEK, S. (2006A): 2006 Spring Flood in the Czech Republic. Prag: T.G. Masaryk Institut für Wasserforschung
- KLUGE, C. (1996): Statistische Analyse von Hochwasserdurchflüssen. Dresdner Berichte. Heft 7. Institut f
 ür Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft. Institut f
 ür Hydrologie und Meteorologie. Dresden: Technische Universit
 ät (TU)
- KOTYZA, O., CVRK, F., PAŽOUREK, V. (1995): Historické povodně na dolním Labi a Vltavě
- KREJČÍ, J., ZEZULÁK, J., BUCHTELE, J. (2003): Vyhodnocení povodně v srpnu 2002 z pohledu průchodu povodňové vlny Vltavskou kaskádou ČZU, ISBN 80-213-1110-X
- KRÜGER, F., SCHWARTZ, R., KUNERT, M., FRIESE, K. (2006): Methods to calculate sedimentation rates of floodplain soils in the middle region of the Elbe River. Acta hydrochimica et hydrobiologica 34. S. 175–187
- LUA NRW (2002): Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten an den Pegeln des Rheins. Düsseldorf: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. *Im Internet unter:* https://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/sondersam/hochwa/hochwa_s01.pdf (abgerufen im September 2017)
- LUGV BB (2014): Das Sommerhochwasser an Elbe und Havel 2013. Arbeitsbericht des LUGV. Potsdam: Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg. Im Internet unter: http://www.mlul.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/rw_sommerhw-2013.pdf (abgerufen im September 2017)
- LÜTZELBERGER, A. (2002): Wellenlaufzeiten an der Saale. Projektbearbeitung im Auftrag der TLUG (*unveröffentlicht*)
- MITTELSDORF, H. (2007): Die Geschichte der Saale-Talsperren (1890-1945). 1. Auflage. Jena: Verlag Vopelius
- MŽP (2003): Meteorologické příčiny katastrofální povodně v srpnu 2002. *Im Internet unter:* http://voda.chmi.cz/pov02/1etapa/2kapitola.pdf (abgerufen im Oktober 2017)
- OFM (1981): Mittlere Wellenlaufzeiten der Saale bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen. Studienarbeit. Oberflussmeisterei Gera (*unveröffentlicht*)
- OPPERMANN, R., ILSE, J., LAUSCHKE, C., RICHTER, K. & SIEDSCHLAG, S. (1994): Unterschuchung der Abflusskurven an ausgewählten Elbepegeln. BfG-Bericht 806. Berlin: Bundesanstalt für Gewässerkunde

- POH (2010): Talsperren im Wirkungskreis des Staatsbetrieb Povodí Ohře. *Im Internet unter:* http://www.poh.cz/vd/vd_publikace/Povodi_Ohre_Vodni_dila_2010_de.pdf (abgerufen im Januar 2018)
- POH (2011): Povodí Ohře, státní podnik, vodohospodářský dispečink. Zpráva o povodni, 01/2011, povodňová situace 13. 14. 1.2011
- POH (2017): Informationsseite des Povodí Ohře mit Echtzeitdaten zu den hydrologischen Verhältnissen im Einzusgebiet. *Im Internet unter:* http://www.poh.cz/portal/sap/cz/index.htm (abgerufen im September 2017)
- PVL (2003): Vodohospodářský dispečink Povodí Vltavy, státní podnik. Souhrnná zpráva o povodni v srpnu 2002 za Povodí Vltavy. Prag
- PVL (2011): Povodí Vltavy, státní podnik, útvar centrálního vodohospodářského dispečinku.
 Souhrnná zpráva o povodni v oblastech povodí Horní Vltavy, Berounky a Dolní Vltavy
 Povodeň leden 2011. Prag
- PVL (2017): Informationsseite des Povodí Vltavy mit Echtzeitdaten zu den hydrologischen Verhältnissen im Einzusgebiet. Im Internet unter: http://www.pvl.cz/portal/SaP/pc/(abgerufen im September 2017)
- RECKNAGEL, T., HAUNERT, G., HILLEBRAND, G. (2017): Einfluss von Veränderungen der Vorlandtopographie auf Hochwasserscheitel. Literaturstudie (*unveröffentlicht*)
- ROMMEL, J. (2003): Machbarkeitsstudie zur Quantifizierung hochwasserbeeinflussender Veränderungen im Vorland der freifließenden deutschen Elbe. Im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- ROMMEL, J. (2010): Aspekte der Ufer- und Vorlandhöhenänderung entlang der freifließenden deutschen Elbe. Im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- ROMMEL, J. (2012): Recherche und Aufbereitung von Inhalten historischer Karten der Elbe zur Nutzung in der Flusshydrologischen Software FLYS. Projektabschlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz (*unveröffentlicht*)
- ROMMEL, J. (2014): GIS-Aufbereitung von Inhalten der Elbstromkarte "Zustand 1890". Projektinterner Abschlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz (*unveröffentlicht*)
- SACHS, L. (1993): Statistische Methoden. Planung und Auswertung. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag
- SIMON, M. (1983): Auswirkungen wasserbaulicher Maßnahmen auf den Hochwasserablauf der Elbe. Magdeburg: Wasserwirtschaftsdirektion Untere Elbe

- SIMON, M. (1996): Anthropogene Einflüsse auf das Hochwasserabflussverhalten im Einzugsgebiet der Elbe. Wasser und Boden, Heft 2 (1996), Seiten 19-23
- STUDY OF VLTAVA WATERWAY (1911): Branch of c.k. headquarters for the construction of waterways in Prague
- TANDLER (2014): Verfahrensbeschreibung DIGIT++. Digitalisierung von analogen Messschreiberaufzeichnungen. Projektinterner Kurzbericht (*unveröffentlicht*)
- TLUG (2007): Saaletalsperren Wasserwirtschaftsplan Entwurf 03/2007. Jena: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
- TLUG (2015): Hochwasserabflüsse in Thüringen. Schriftenreihe der TLUG. Band 108. Jena: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
- TLUG (2015A): Hydrologischer Gewässerlängsschnitt der Saale (Stand: Juli 2015). Jena: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. Im Internet unter: https://www.thueringen.de/mam/th8/tlug/content/wasser/gw_laengsschnitt/hls_saale.pdf (abgerufen im September 2015)
- USACE (2016): HEC-RAS River Analysis System. User's Manual. Version 5.0 vom Februar 2016. Davis: Hydrologic Engineering Center des US Army Corps of Engineers
- VATTENFALL AG (2017): Die Saalekaskade. Im Internet unter: http://www.vattenfall.de/de/saalekaskade/saalekaskade.htm (abgerufen im September 2017)
- VEB PUMPSPEICHERWERKE (Jahr unbekannt): Pumpspeicherwerke der DDR. Hohenwarte: Volkseigener Betrieb Pumpspeicherwerke.
- WASY (2005): HQ-Ex 3.0. Benutzerhandbuch. Berlin: DHI WASY
- WASY (2010): Gemeinsames Gutachten der Länder Brandenburg und Sachsen-Anhalt zur Flutung der Havelniederung bei Hochwasserereignissen (größer HQ₁₀₀). *Im Internet unter: http://www.wasserblick.net/servlet/is/110957/ (abgerufen im September 2017)*
- WIKIPEDIA-AUTOREN (2014): Seite "Strombauverwaltung". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 10. Oktober 2014. Im Internet unter: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Strombauverwaltung&oldid=134776638 (aufgerufen im November 2014)
- WSA BRANDENBURG (2001): Die Verlegung der Havelmündung. Arbeits- und Informationspapier (*unveröffentlicht*)