

BfG-1962

# Abschlussbericht

## WAVOS Elbe Verbesserung der HW-Vorhersage

Autoren: Meißner, Dennis  
Gleim, Andrea  
Rademacher, Silke  
Stürmer, Wolfgang

Auftraggeber: FGG Elbe



SAP-Nr.: M39610204049

Anzahl der Seiten: 84

Dezember 2018



## **Impressum**

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

**DOI: 10.5675/BfG-1962**

**URL: <http://doi.bafg.de/BfG/2018/BfG-1962.pdf>**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>10</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2 Aufbau des Hochwasservorhersagemodells in SOBEK</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Basismodell</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Aktualisierung des Basismodells</b>	<b>15</b>
2.2.1 Aktualisierung Elbe-Umflutkanal und Bereich Magdeburg	16
2.2.2 Aktualisierung Schwarze Elster, Mulde und Saale	17
<b>2.3 Erweiterung des Basismodells</b>	<b>22</b>
2.3.1 Modellerweiterung Tideelbe: Geesthacht bis Zollenspieker	23
2.3.2 Modellerweiterung im Rückstaubereich kleinerer Nebengewässer	26
<b>2.4 Implementierung Havel – Havelsteuerung</b>	<b>30</b>
2.4.1 Wehre Garz und Grütz	30
2.4.2 Havelpolder	31
2.4.3 Wehrgruppe Quitzöbel und Gnevsdorfer Wehr	32
<b>2.5 Neue Einteilung der Zwischeneinzugsgebiete im sächsischen Elbeabschnitt</b>	<b>35</b>
<b>2.6 Vereinfachte Berücksichtigung potenzieller Deichbrüche in der operationellen Vorhersage</b>	<b>36</b>
<b>2.7 Modelllayout</b>	<b>38</b>
<b>3 Das Modellsystem SOBEK und das GIS-Werkzeug ArcSOBEK</b>	<b>41</b>
<b>4 Kalibrierung und Validierung</b>	<b>44</b>

<b>4.1</b>	<b>Kalibrierungs- bzw. Validierungsereignisse</b>	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Vorgehensweise und Rauheitsansatz</b>	<b>45</b>
<b>4.3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>46</b>
4.3.1	Hochwasserereignis 2013	47
4.3.2	Hochwasserereignis 2011	50
4.3.3	Hochwasserereignis 2006 (Validierung)	52
4.3.4	Hochwasserfixierung 2013 (Validierung)	54
<b>4.4</b>	<b>Interaktion Oberflächengewässer – Grundwasser</b>	<b>56</b>
<b>4.5</b>	<b>Untersuchung zur Einbindung von 2D-Abschnitten</b>	<b>57</b>
<b>5</b>	<b>Analyse der Unsicherheiten des aktualisierten Vorhersagemodells für den Hochwasserfall</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>Analyse der Scheitelwerte</b>	<b>59</b>
<b>5.2</b>	<b>Analyse der Scheiteleintrittszeitpunkte</b>	<b>61</b>
<b>5.3</b>	<b>Statistische Analyse der Hindcast</b>	<b>62</b>
<b>6</b>	<b>Modellzustand 2018</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Anpassungen des Vorhersagesystems WAVOS</b>	<b>75</b>
<b>7.1</b>	<b>Parallele Nutzung von WAVOS-1D und SOBEK</b>	<b>75</b>
<b>7.2</b>	<b>Zuflussvorhersagen</b>	<b>75</b>
<b>7.3</b>	<b>Bauwerke</b>	<b>76</b>
<b>7.4</b>	<b>Interaktive Anpassung von Vorhersagen</b>	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>79</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>82</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Basisdaten zur Erweiterung / Aktualisierung des SOBEK-Basismodells .....	15
Tabelle 2:	Wehre Saale (Quelle: Wasserstraßendatenbank der WSV).....	22
Tabelle 3:	Im Vorhersagemodell implementierte Flutpolder an der Havel.....	31
Tabelle 4:	Gegenüberstellung der Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel außerhalb von Hochwasserereignissen .....	33
Tabelle 5:	Gegenüberstellung der Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel während der Elbescheitelkappung.....	34
Tabelle 6:	Gegenüberstellung der Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel zur Entlastung der Havelniederung nach Durchgang eines Elbehochwassers .....	34
Tabelle 7:	Aktualisierte Einteilung der Zwischeneinzugsgebiete für die Hochwasservorhersage Elbe im tschechischen und sächsischen Elbeabschnitt des Vorhersagemodells .....	35
Tabelle 8:	Zuflüsse und Referenzpegel des aktuellen Hochwasservorhersagemodells der Elbe .....	39
Tabelle 9:	Zur Kalibrierung und Validierung verwendete Hochwasserereignisse.....	45
Tabelle 10:	Güteparameter für ausgewählte Pegel für das Hochwasser 2013 .....	48
Tabelle 11:	Güteparameter für ausgewählte Pegel für das Hochwasser 2011 .....	50
Tabelle 12:	Güteparameter für ausgewählte Pegel für das Hochwasser 2006 .....	52
Tabelle 13:	Übersicht der im SOBEK-Modell „Zustand 2018“ berücksichtigten hochwassermindernden Maßnahmen (DRV = Deichrückverlegung) .....	70

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematisierung der Deichrückverlegung Lenzen im SOBEK-Modell .....	15
Abbildung 2:	Entwicklung der Öffnungsbreite des Pretziener Wehrs im Hochwasservorhersagemodell beim Hochwasser 2013.....	16
Abbildung 3:	Vergleich der Abflussaufteilung im Bereich der Alten Elbe in Magdeburg zwischen der im WAVOS-1D – Modell implementierten statischen Funktion und der hydrodynamischen Berechnung in SOBEK .....	17
Abbildung 4:	Schwarze Elster, Bereich Mönchenhöfe (Hintergrund oben: © GeoBasis-DE / BKG 2011) .....	19
Abbildung 5:	Ausschnitt Mulde-Terrain mit Querprofilspuren (Hintergrund: © GeoBasis- DE / BKG 2015).....	20
Abbildung 6:	Ausschnitt Saale-Terrain mit Querprofilspuren, Bereich Rothenburg (Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2015) .....	21

Abbildung 7:	Übersicht DGM Tideelbe, Pegel Geesthacht bis Pegel Zollenspieker, oben links: Foto des Pegels Zollenspieker, unten Mitte: Detail im Bereich des Wehrs Geesthacht.....	23
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der Implementierung des Wehrs Geesthacht im Vorhersagemodell (Bauwerk + Regler / Controller + Schalter / Trigger).....	25
Abbildung 9:	Darstellung der Wasserstände am Pegel Zollenspieker zwischen dem 09.06. und dem 23.06.2018 (schwarz: Messdaten, rot: Vorhersage des BSH, verlängert um 2 Tage) .....	26
Abbildung 10:	Lageplan des Ohremündungsbereichs bis Wolmirstedt, Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2015 (links), höhenabhängige Retentionsfläche im Vorhersagemodell im Bereich der Ohremündung (rechts).....	27
Abbildung 11:	Lageplan der Tangermündung, Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2015 (links), höhenabhängige Retentionsfläche im Vorhersagemodell im Bereich der Tangermündung (rechts) .....	28
Abbildung 12:	Aland-Mündungsbereich bei Schnackenburg, Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2011.....	29
Abbildung 13:	Modellnetz der Havel / Unteren Havel-Wasserstraße (Hintergrund: © WMS-Dienst Top. Karten (ITZ Bund).....	30
Abbildung 14:	Jahreszeitabhängige Stauziele der Havelwehre Garz und Grütz .....	31
Abbildung 15:	Struktur des Hochwasservorhersagemodells im Bereich der Wehrgruppe Quitzöbel .....	32
Abbildung 16:	Schematische Darstellung potenzieller Deichbruchstellen im Vorhersagemodell.....	37
Abbildung 17:	Modellstruktur des SOBEK-Modells der Elbe zur Hochwasservorhersage..	38
Abbildung 18:	Datenquellen (Geländemodell, Lufbild, Hochwassergefahrenkarte) zur Festlegung modellrelevanter Geofachdaten (hier: durchströmter Bereich)...	42
Abbildung 19:	Prinzipskizze der Höhen-Breiten-Auswertung innerhalb von ArcSOBEK für eine Querprofil mit Sommerdeich (Quelle: BCE 2017).....	43
Abbildung 20:	Beispiel Rauheitsdefinition im Querprofil für die drei Profilbereiche .....	46
Abbildung 21:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Barby beim Hochwasser 2013 .....	48
Abbildung 22:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Wittenberge beim Hochwasser 2013 .....	49
Abbildung 23:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Calbe-UP / Saale beim Hochwasser 2013...	49

Abbildung 24:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Dresden beim Hochwasser 2011.....	51
Abbildung 25:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Barby beim Hochwasser 2011 .....	51
Abbildung 26:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Geesthacht beim Hochwasser 2011 .....	52
Abbildung 27:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Magdeburg-Strombrücke beim Hochwasser 2006.....	53
Abbildung 28:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Neu Darchau beim Hochwasser 2006.....	53
Abbildung 29:	Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Hohnstorf beim Hochwasser 2006.....	54
Abbildung 30:	Stationäre Modellvalidierung anhand der Wasserspiegelfixierung 2013, Vergleich der Messwerte (blau) und Modellergebnisse (rot) und Darstellung der Differenzen (schwarz) zwischen Elbe-km 108 und 583.....	55
Abbildung 31:	Stationäre Modellvalidierung anhand der Wasserspiegelfixierung 2013, Ausschnitt auf den Bereich Elbe-km 400 – 583 (blau: Messung, rot: Simulation, schwarz: Differenz).....	56
Abbildung 32:	Abflussaufteilung / Kurzschlussströmungen im Mündungsbereich Schwarze Elster, 2D-Simulation mit SOBEK (Version Rural) für das HW2006 (Quelle: ARGE SOBEK Elbe 2009) .....	58
Abbildung 33:	Längsschnitt der Scheitelwerte (gemessen, simuliert mit dem WAVOS-1D - Modell, simuliert mit dem SOBEK-Modell) für das Hochwasser 2006.....	60
Abbildung 34:	Längsschnitt der Scheitelwerte (gemessen, simuliert mit dem WAVOS-1D - Modell, simuliert mit dem SOBEK-Modell) für das Hochwasser 2011.....	60
Abbildung 35:	Längsschnitt der Scheitelwerte (gemessen, simuliert mit dem WAVOS-1D - Modell, simuliert mit dem SOBEK-Modell) für das Hochwasser 2013.....	60
Abbildung 36:	Zeitliche Abweichung des Scheiteleintrittspunkts Modell – Messung für die Hochwasser 2006, 2011 und 2013 mit dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (ohne Projektionspegel) .....	62
Abbildung 37:	Zeitliche Abweichung des Scheiteleintrittspunkts Modell – Messung für die Hochwasser 2006, 2011 und 2013 mit dem aktuellen SOBEK – Modell .....	62



Abbildung 38: Ganglinien-Vergleich der Vorhersagen beim Hochwasser 2013 für den Pegel Magdeburg-Strombrücke mit dem SOBEK-Modell (oben) und dem WAVOS-1D - Modell (unten).....	64
Abbildung 39: Ganglinien-Vergleich der Vorhersagen beim Hochwasser 2011 für den Pegel Dresden mit dem SOBEK-Modell (oben) und dem WAVOS-1D - Modell (unten) .....	65
Abbildung 40: Darstellung der Modellunsicherheiten beim Hochwasser 2011 am Pegel Halle-Trotha für das SOBEK-Modell (links) sowie das WAVOS-1D – Modell (rechts) in Form von Boxplots über den Vorhersagezeitraum von 192 Stunden .....	65
Abbildung 41: Darstellung der Modellunsicherheiten beim Hochwasser 2011 am Pegel Havelberg-Stadt für das SOBEK-Modell (links) sowie das WAVOS-1D – Modell (rechts) in Form von Boxplots über den Vorhersagezeitraum von 192 Stunden .....	66
Abbildung 42: Darstellung der Modellunsicherheiten beim Hochwasser 2006 an den Pegeln Meißen (links) und Dresden (rechts) in Form von Boxplots über den Vorhersagezeitraum von 192 Stunden.....	66
Abbildung 43: Ganglinien-Vergleich der 24- und 48-Stunden-Vorhersagen beim Hochwasser 2013 für die Pegel Mühlberg (oben) und Torgau (unten) .....	67
Abbildung 44: Kontingenztafel, Pegel Dömitz, Schwellenwert 650 cm, Vorhersagelänge 24h, 48 h, 96h, 168h, Hochwasser 2013, SOBEK-Modell.....	68
Abbildung 45: Kontingenztafel, Pegel Dömitz, Schwellenwert 650 cm, Vorhersagelänge 24h, 48 h, 96h, 168h, Hochwasser 2013, WAVOS-1D - Modell .....	68
Abbildung 46: Schematisierung der Polder Löbnitz und Rösa an der Mulde im SOBEK-Modell .....	71
Abbildung 47: Verlängerte Querprofilspuren (blau) im Bereich der DRV Mauken-Klöden ....	72
Abbildung 48: Verlängerte Querprofilspuren(blau) im Bereich der DRV Lödderitzer Forst sowie Darstellung des durchströmten und nicht-durchströmtem Bereichs, der Modellgrenze sowie der Profilknoten entlang der Gewässerachse (Hintergrundkarte: TK25) .....	73
Abbildung 49: Auswahl des Rechenkerns / Berechnungsmodells in WAVOS.....	75
Abbildung 50: Allgemeine Darstellung der Zuflussvorhersagen in der WAVOS-Oberfläche; oben: Wasserstände, unten: Abflüsse .....	76
Abbildung 51: WAVOS-Dialogmaske für das Editieren der Pumpeneinstellungen .....	77
Abbildung 52: Anwendersicht auf das neu erstellte Werkzeug zur interaktiven Anpassung von Vorhersagen (Quelle: BCE 2018d).....	78

## Abkürzungsverzeichnis

BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CHMI	Czech Hydrometeorological Institute (tschechisch: CHMU - Český hydrometeorologický ústav)
DGM-W	digitales Geländemodell des Wasserlaufs
ELBA	Wasserstandsvorhersagesystem, Nachfolger des Zentralmodells Elbe
FGG	Flussgebietsgemeinschaft
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
HHW	höchster bislang gemessener Wasserstand an einem Pegel
HVZ	Hochwasservorhersagezentrale
HW	Hochwasser
HWIMS	Hochwasserinformations- und -managementsystem des Freistaates Sachsen
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt
LHWZ	Landeshochwasserzentrum (Sachsen)
MHQ	mittlerer Hochwasserabfluss
NHWSP	Nationales Hochwasserschutzprogramm, koordiniert durch das BMUB
UHW	Untere Havel-Wasserstraße
VHS	Vorhersage
WAVOS	Wasserstandsvorhersagesystem (Entwicklung BfG)
WAVOS-1D	Eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Modellsystem (Entwicklung BfG)
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSD	Wasserstraßen- und Schifffahrtsdirektion (jetzt: GDWS)
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

# 1 Einleitung

Das Hochwasserereignis im Juni 2013 führte an Elbe und Saale auf weiten Abschnitten zu bisher noch nicht gemessenen Wasserständen. Unterstrom des Elbe-Pegels Coswig wurden auf dem rund 350 km langen Abschnitt der Binnenelbe bis zum Wehr Geesthacht die bisherigen eisfreien höchsten bekannten Wasserstände (teilweise mit Beträgen von über 70 cm) überschritten. An der Saale überstiegen die 2013 gemessenen Wasserstände auf der gesamten Strecke der Bundeswasserstraße zwischen Bad Dürrenberg und der Mündung in die Elbe die bisherigen Höchstmarken (BfG 2014). Dieses extreme Ereignis stellte entsprechend auch die operationelle Hochwasservorhersage sowie die zu diesem Zweck eingesetzten Vorhersagemodelle und -systeme vor besondere Herausforderungen. Einerseits war der Kalibrierungs- und Validierungsbereich der Vorhersagemodelle mitunter weit überschritten. Zum anderen traten unvorhersehbare, plötzliche Änderungen im modellierten Natursystem in Form von Deichbrüchen ein. Trotz der Schwere des Ereignisses wurden während des gesamten Hochwasserverlaufs 2013 in der Hochwasservorhersagezentrale des Landes Sachsen-Anhalt (HVZ LSA) beim Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft (LHW) und dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Magdeburg durchgängig Vorhersagen mit dem von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) erstellten WAVOS-1D – Modell (Steinebach 1999, Burek & Rademacher 2007) berechnet. Aufgrund der beträchtlichen Unsicherheiten der reinen Modellergebnisse – gerade im Hinblick auf die Abbildung der Anstiegsphasen im Längsschnitt der zahlreichen Elbepegel – war zur Herausgabe der Hochwasservorhersagen während des Ereignisses ein sehr aufwändiger Plausibilisierungsprozess in der HVZ LSA erforderlich. Vor diesem Hintergrund ergab sich die Erfordernis einer umfassenden Optimierung und Erweiterung des für den Hochwasserfall verwendeten Wasserstandsvorhersagemodells für die deutsche Binnenelbe einschließlich Saale und Havel.

Gemäß der zum 01. Juli 2013 in Kraft getretenen Verwaltungsvereinbarung zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den Ländern Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zur „Wasserstands-/ Hochwasservorhersage für die Bundeswasserstraßen Elbe, Saale und Untere Havel-Wasserstraße (Havelberg Stadt)“ erstellt die HVZ LSA mit Unterstützung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) für die in der Durchführungsanweisung benannten Pegel der Bundeswasserstraßen Elbe, Saale und Havel (Havelberg Stadt) im Hochwasserfall täglich Hochwasservorhersagen. Das Landeshochwasserzentrum (LHWZ) des Freistaates Sachsen erstellt bei Hochwasser im sächsischen Abschnitt der Elbe Vorhersagen. Die HVZ LSA übernimmt nach erfolgter Abstimmung diese Vorhersagen für die gemeinsame Hochwasservorhersage der gesamten Binnenelbe. Im LHWZ Sachsen kommt neben dem konzeptionellen Elbe-Modell des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) bis dato auch das WAVOS-1D – Modell der BfG zum Einsatz.

Da der identifizierte Optimierungs- und Erweiterungsbedarf des Hochwasservorhersagemodells für die deutsche Binnenelbe deutlich über die Erfordernisse des Bundes im Interesse der Schifffahrt hinausgeht, wurde die BfG als Entwickler des bestehenden Vorhersagemodells im März 2015 von der Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Elbe mit der Aktualisierung und Wei-

terentwicklung des Vorhersagemodells für den Hochwasserfall beauftragt (siehe Verwaltungsvereinbarung für die Zusammenarbeit zur „Verbesserung Hochwasservorhersage Elbe“ Teil 1: „Aktualisierung und Erweiterung von WAVOS Elbe für den Hochwasserfall“ zwischen der FGG Elbe und der BfG). Diese Beauftragung umfasst auch die erforderliche Anpassung des von der BfG entwickelten Vorhersagesystems WAVOS (Rademacher et al. 2004), das in der HVZ Elbe neben dem Server-basierten System KALYPSO (BCE 2018a, BCE 2018b, BCE 2018c) weiterhin als Einzelplatzversion vorgehalten und betrieben wird. Im März 2017 hat die BfG im Rahmen eines Zwischenberichts (BfG 2017) eine umfassende Bestandsanalyse des bestehenden WAVOS-1D – Vorhersagemodells als Grundlage für die gezielte Weiterentwicklung eines Hochwasservorhersagemodells für die deutsche Binnenelbe durchgeführt. Anhand der Hochwasserereignisse 2013, 2011 und 2006 wird dort auch aufgezeigt, welche Genauigkeiten in der Vorhersage über den Verlauf der Hochwasserereignisse zu erreichen waren und welche Unsicherheiten in der Vorhersage bestehen. Des Weiteren dokumentiert der Zwischenbericht eine Beschreibung der umfangreichen Datenakquise (hydrologische Daten, Geobasis- und Geofachdaten) als Ausgangspunkt der Modellaktualisierung und -erweiterung.

Der vorliegende Endbericht dokumentiert die vielschichtigen Verbesserungen der Hochwasservorhersage an der deutschen Binnenelbe, die die Aktualisierung der Modelltopographie, der Modellstruktur, der Modellsoftware sowie der Modellkalibrierung aber auch Optimierungen der Eingangsdaten sowie des Vorhersagesystems WAVOS umfassen. Kapitel 2 beschreibt ausführlich die einzelnen Arbeitsschritte zur Verbesserung des hydrodynamischen Vorhersagemodells. Einen Schwerpunkt nehmen neben den umfangreichen Datenaktualisierungen die zahlreichen, für den Hochwasserverlauf relevanten Bauwerke und ihre Steuerungen ein. Das Resultat dieser Arbeiten ist die aktualisierte Modellstruktur, die in Kapitel 2.7 dargestellt ist. In Kapitel 3 wird kurz das in den Niederlanden entwickelte und weltweit eingesetzte Modellsystem SOBEK vorgestellt, welches die softwaretechnische Grundlage des aktualisierten Hochwasservorhersagemodells der Elbe bildet. Der fachliche Hintergrund für die Umstellung des Modellsystems von WAVOS-1D auf SOBEK ist einerseits die Zukunftssicherheit, da der Berechnungskern WAVOS-1D der BfG nicht weiter unterstützt wird. Zum anderen erhöht die Umstellung auf SOBEK die Flexibilität bei der Unterstützung des Modelleinsatzes sowie der Modellpflege, da zahlreiche Ingenieurbüros, auch im deutschsprachigen Raum, Leistung basierend auf der Software SOBEK anbieten. Kapitel 4 widmet sich der Modellkalibrierung und -validierung einschließlich der in diesem Zuge betrachteten Aspekte, die für ein operationelles Vorhersagemodell bedeutsam sind (z. B. Rechenzeiten). Der Quantifizierung der Unsicherheiten des Vorhersagemodells, die im Zuge der Arbeiten gegenüber dem Vorgängermodell insgesamt reduziert werden konnten, jedoch auch zukünftig nie gänzlich verschwinden werden, widmet sich Kapitel 5 anhand der Hochwasser 2006, 2011 und 2013. Kapitel 6 beschreibt, welche Anpassungen an dem kalibrierten / validierten Vorhersagemodell erforderlich waren, um ein, den Ist-Zustand („Modellzustand 2018“) beschreibendes Vorhersagemodell zu erhalten. Hierzu galt es die seit 2013 umgesetzten (oder sich in der Umsetzung befindlichen) Maßnahmen des Hochwasserschutzes (Polder, Deichrückverlegungen) in das kalibrierte Modell einzupflegen. Dieses Modell im „Zustand 2018“ (und nicht das zur Kalibrierung verwendete Modell) wird zukünftig in der operationellen Hochwasservorhersage eingesetzt werden. Da auch das Vorhersagesystem WAVOS weiterhin für die Hochwasservorhersage an der Elbe zum Einsatz kommt, galt es dieses entsprechend der ver-

änderten / erweiterten Modellfunktionalitäten ebenfalls anzupassen. Auch diesbezüglich nimmt die Steuerung von Bauwerken eine wichtige Stellung ein (siehe Kapitel 7). Das abschließende Kapitel 8 fasst noch einmal die wesentlichen Aspekte der Verbesserung und Erweiterung des Hochwasservorhersagemodells zusammen, indem die wichtigsten Unterschiede zwischen dem aktualisierten und dem bis dato betriebenen Vorhersagemodell aufgelistet werden. Ein kurzer Ausblick auf zukünftig anstehende Aufgaben im Kontext des Vorhersagemodells schließt den Bericht ab.

Modelltechnische Details sowie eine anwendungsbezogene Beschreibung des Vorhersagemodells in Kombination mit dem Vorhersagesystem WAVOS Elbe für den operationellen Betrieb sind in einem separaten Anwenderhandbuch dokumentiert (BfG 2018).

## 2 Aufbau des Hochwasservorhersagemodells in SOBEK

Das neue Hochwasservorhersagemodell wurde auf Basis der Software SOBEK, Version SOBEK-River 2.15.003 (Deltares 2016, Stelling & Duinmeijer 2003), erstellt. Hinsichtlich der Modelltechnik ähnelt SOBEK dem bisher eingesetzten Modellsystem WAVOS-1D (Steinebach 1999, Burek & Rademacher 2007), da es sich bei beiden Systemen um eindimensionale hydrodynamisch-numerische (1D HN) Modellsysteme handelt, die auf der Lösung der vollständigen Saint-Venant-Gleichung basieren. Eine ausführlichere Beschreibung der Modellierungssoftware SOBEK findet sich in Kapitel 3. Um auch in Zukunft die Lauffähigkeit und erforderliche Funktionalität der eingesetzten Modellsoftware sicherzustellen, wurde im Zuge der Aktualisierung und Erweiterung des Hochwasservorhersagemodells auch der Wechsel von WAVOS-1D zu SOBEK vollzogen.

### 2.1 Basismodell

Im Jahr 2009 wurde im Auftrag der BfG bereits ein 1D-Simulationsmodell auf Basis der Software SOBEK zur (nicht-operationellen!) Berechnung hydraulischer und morphologischer Prozesse an der Binnenelbe aufgebaut (ARGE SOBEK-Elbe 2009). Dieses erste SOBEK-Modell der Elbe umfasst die Elbe zwischen Ústí nad Labem und Geesthacht (Elbe-km -38,7 bis Elbe-km 583,36) sowie – jeweils ab ihrer Mündung – die Zuflüsse Schwarze Elster auf einer Länge von ca. 7 km, Mulde bis zum Pegel Priorau (ca. 26 km), Saale bis zum Pegel Halle-Trotha (ca. 90 km) und Havel bis zum Pegel Rathenow (ca. 63 km). Die topografische Grundlage für dieses SOBEK-Modell entspricht weitestgehend derjenigen des bis dato eingesetzten WAVOS-1D – Modells. Konkret wurde zur Ableitung der Querprofile für die hydraulische Modellierung der insgesamt ca. 810 Gewässerkilometer ein zusammenhängendes Digitales Geländemodell mit integriertem Wasserlauf (DGM-W) herangezogen. Für den deutschen Teil der Elbe, die Saale von der Mündung bis km 20, die Mulde von der Mündung bis Mulde-km 17 sowie die Schwarze Elster auf ihrer gesamten zu modellierenden Länge basiert das zum Modellaufbau eingesetzte DGM-W auf dem DGM-W 2006 (BfG 2017, ARGE SOBEK-Elbe 2009). Für den Elbe-Abschnitt in Tschechien zwischen der Landesgrenze und Ústí nad Labem stand ein Digitales Höhenmodell mit einer Rasterweite von 2,5 m zur Verfügung. Zur Abbildung der Buhnen wurde das Buhnenkataster von 2003 verwendet, ergänzt durch Querprofildaten unterschiedlichen Datums. Die Zuflüsse Saale (stromauf von Saale-km 20) und Mulde (stromauf von Mulde-km 17) sind im DGM-W 2006 nicht enthalten. Hier wurde für die Vorlandabbildung im Basismodell das DGM25 verwendet, für die Flussschlauche lagen Gewässerprofile vor, ferner die Bauwerksdaten der Saalewehre. Für die Havel bildete ein DGM-W der BfG mit Geodaten von 2004 (BfG 2005) die topografische Grundlage. Die landseitige Berandung bilden Deiche bzw. in deichfreien Abschnitten die Grenze des potenziellen Überflutungsgebiets. Die Kalibrierung dieses Modells erfolgte stationär anhand von einem Niedrigwasser- (2004) und einem Mittelwasserereignis (2005) sowie stationär und instationär anhand von zwei Hochwasserereignissen (2005 und 2006). Das Ende 2009 fertiggestellt SOBEK-Modell wurde nach Umsetzung der Deichrückverlegungen (DRV) Bleckede,

Mahnkenwerder und Lenzen durch die BfG entsprechend angepasst. Dazu wurden die geometrischen Veränderungen im Natursystem in die Querprofile sowie die Modellstruktur eingearbeitet sowie eine Nachkalibrierung anhand der Hochwasserereignisse 2011 und 2013 durchgeführt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft, wie die Deichrückverlegung Lenzen mit Mitteln eines 1D-Modells im SOBEK-Modell abgebildet ist.

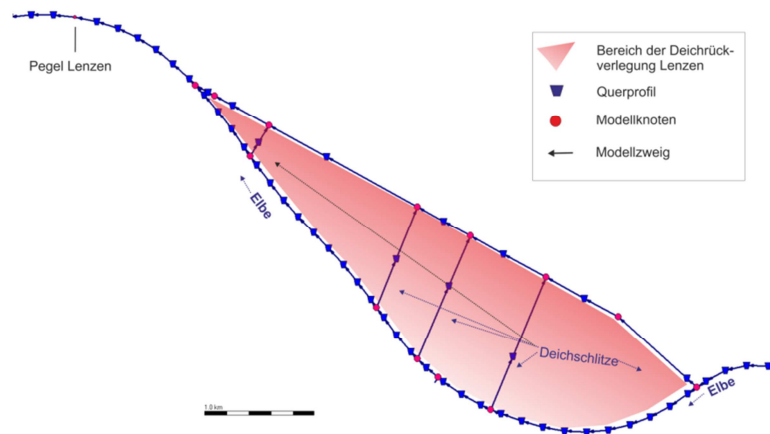


Abbildung 1: Schematisierung der Deichrückverlegung Lenzen im SOBEK-Modell

Das so ergänzte Modell bildete die Ausgangslage zum Aufbau des neuen 1D HN-Modells für die operationelle Vorhersage an der Binnenelbe und wird im Folgenden als „Basismodell“ bezeichnet.

## 2.2 Aktualisierung des Basismodells

Die für den zukünftigen operationellen Einsatz in der Hochwasservorhersage erforderlichen Erweiterungen und Aktualisierungen des SOBEK-Basismodells sind im Weiteren detailliert beschrieben. Die in diesem Zuge genutzten Geobasisdaten listet Tabelle 1 für die unterschiedlichen Abschnitte getrennt nach Fluss- / Uferbereich, Vorlandbereich sowie den Deichverläufen auf. Dabei wird auch die Datenquelle genannt.

Tabelle 1: Basisdaten zur Erweiterung / Aktualisierung des SOBEK-Basismodells

Gewässer	Abschnitt	Datenaktualität / Datenquelle		
		Fluss / Ufer	Vorland	Deiche
Elbe	Bereich Magdeburg (km 300.0 – 338.6)	(DGM-W 2006)	2012/2013	(DGM-W 2006)
		DGM1 Sachsen-Anhalt		
Elbe	Tideelbe (km 583.4 – 598.2)	2006-2011	2010/2011	2010/2011
		DGM-W		
Schw. Elster	Mündung bis Löben (km 0 – 21.6)	2009	2009 / 2015	2003/2006
		HYDRO_AS-2D - Modell		
Mulde	Mündung bis Golzern (km 0 – 128.4)	2014/2015	2009	2012
		HYDRO_AS-2D - Modell		
Saale	Mündung bis Naumburg (km 0 – 163.9)	2012	2010	2011
		HYDRO_AS-2D - Modell		

## 2.2.1 Aktualisierung Elbe-Umflutkanal und Bereich Magdeburg

Im Bereich Magdeburg wurden aufgrund der im Elbe-Umflutkanal fortlaufend durchgeführten Unterhaltungsmaßnahmen die Daten zwischen Elbe-km 300,0 (oberstrom der Stromteilung bei Dornburg) und 338,6 (Querung Autobahn A2 bei Hohenwarthe) im Vorlandbereich gegenüber dem SOBEK-Basismodell sowie auch dem bestehenden WAVOS-1D – Modell aktualisiert. Hierzu wurden aktuelle Geländedaten des Landes Sachsen-Anhalt (Bildflug 2012) verwendet, die zur Weiterverarbeitung in GIS-Terrains umgerechnet wurden. Die Querprofilspuren des Basismodells wurden lagemäßig überprüft und mit Ausnahme kleinerer Anpassungen übernommen. Die Gewässer- und Uferdaten wurden beibehalten, da sie noch ausreichend aktuell sind (BfG 2017). Die Profilerstellung erfolgte mit dem GIS-Werkzeug ArcSobek, welches auch zur Erstellung der Modellprofile des Basismodells eingesetzt wurde (siehe dazu Kap. 3).

Das Pretziener Wehr wurde als einfeldriges Wehr mit einer Gesamtbreite von 112,95 m im Vorhersagemodell implementiert. Bei der Öffnung des Wehrs, welche vom Anwender manuell vorzunehmen ist, wurde die maximale Öffnungsgeschwindigkeit derart parametrisiert, dass der gesamte Öffnungsvorgang (sowie der Schließvorgang) fünf Stunden (Erfahrungswert der vergangenen Einsätze) in Anspruch nimmt (Abbildung 2). Gegenüber dem bestehenden WAVOS-1D – Modell konnte durch diese modelltechnische Option auf eine Aufteilung des Pretziener Wehrs (BfG 2008) verzichtet und die Handhabung im operationellen Fall deutlich vereinfacht werden.

Während im WAVOS-1D – Modell der Abfluss durch die Alte Elbe abflussabhängig durch eine statische Aufteilungsfunktion vorgegeben wird, erfolgt diese Abflussaufteilung zwischen Stromelbe und Alter Elbe im aktualisierten SOBEK-Modell, wie an allen übrigen Verzweigungen, modellintern auf Grundlage der hydrodynamischen Berechnung.

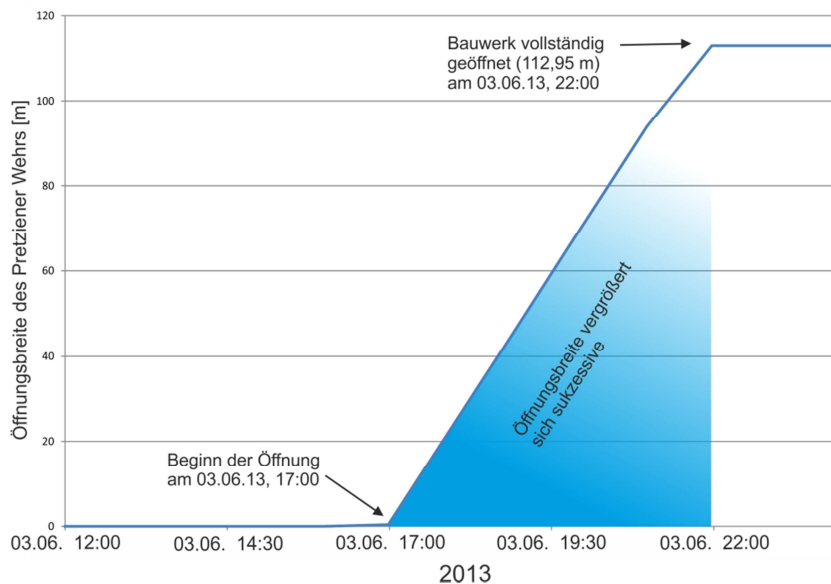


Abbildung 2: Entwicklung der Öffnungsbreite des Pretziener Wehrs im Hochwasservorhersagemodell beim Hochwasser 2013



Abbildung 3 stellt die Ergebnisse des SOBEK-Modells basierend auf den Hochwassern 2006, 2011 und 2013 hinsichtlich der Abflussaufteilung der statischen Funktion gegenüber. Erkennbar wird die gute Übereinstimmung der SOBEK-Modellergebnisse mit der Aufteilungsfunktion. Zudem zeigt sich ein leichter Hysterese-Effekt in den hydrodynamischen Modellergebnissen, d. h. ein Unterschied zwischen Abflussverhältnissen bei ansteigender und abfallender Hochwasserwelle.

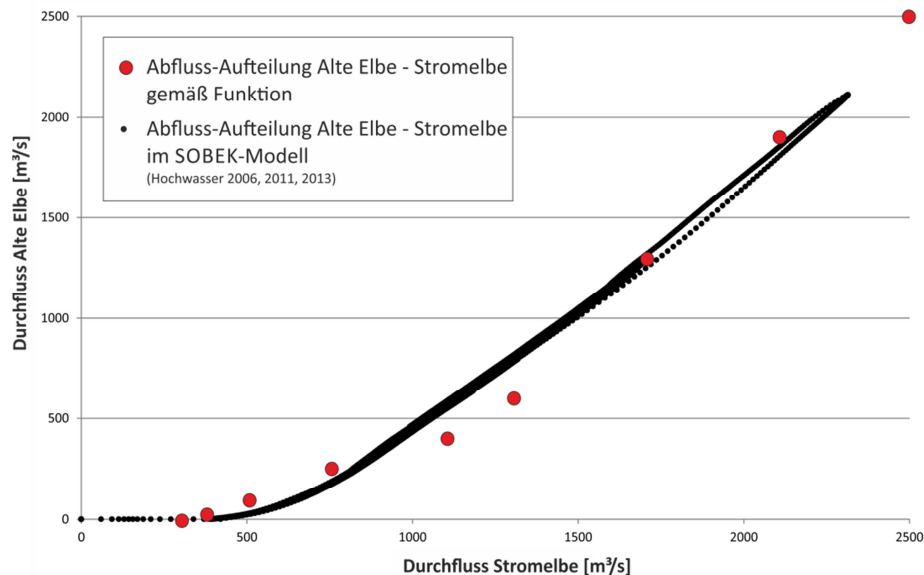


Abbildung 3: Vergleich der Abflussaufteilung im Bereich der Alten Elbe in Magdeburg zwischen der im WAVOS-1D – Modell implementierten statischen Funktion und der hydrodynamischen Berechnung in SOBEK

### 2.2.2 Aktualisierung Schwarze Elster, Mulde und Saale

Das SOBEK-Basismodell beinhaltet bereits Abschnitte der Elbezuflüsse Schwarze Elster, Mulde und Saale als hydrodynamische Modellstränge, um insbesondere Rückstaueffekte bzw. die Interaktion mit der Elbe berücksichtigen zu können. Allerdings besitzen diese Modellstränge im Basismodell nicht die für die Vorhersage erforderlichen Ausdehnungen, wie sie auch im WAVOS-1D – Modell enthalten sind. Dementsprechend galt es die Modellstränge der drei genannten Zuflüsse wie folgt zu erweitern:

- Schwarze Elster: Erweiterung von Fluss-km 9,6 bis zum Pegel Löben (Fluss-km 21,6)
- Mulde: Erweiterung von Pegel Priorau (Mulde-km 23,8) bis zum Pegel Golzern (Mulde-km 128,4)
- Saale: Erweiterung vom Pegel Halle-Trotha (Saale-km 89,15) bis zum Pegel Naumburg (Saale-km 163,9)

Da die verfügbaren Geodaten aus 2D-Modellierungen der Länder aktueller und detaillierter sind, als die seinerzeit für die Erstellung des Basismodells (sowie auch des aktuellen WAVOS-1D – Modells) verwendeten Daten (BfG 2017), wurde die erforderliche Modellerweiterung an den drei Elbe-Zuflüssen zugleich genutzt, um die Daten entlang der bestehen-

den Abschnitte zu aktualisieren. Die Modellstränge von Schwarzer Elster, Mulde und Saale wurden daher im Zuge der Erweiterung des Basismodells komplett neu aufgebaut und aktualisiert.

Die Geometrieinformationen zur Ableitung der SOBEK-Profile wurden 2D-Modellen entnommen, indem die Berechnungsknoten als xyz-Tripel im ASCII-Format extrahiert und in ArcGIS Terrain-Datasets umgerechnet wurden. Bei einem Terrain handelt es sich um eine TIN-basierte Oberfläche (TIN - Triangulated Irregular Network), deren Datenorganisation ein komfortables Handling hinsichtlich Verwendung als Quelle für Oberflächeninformationen des abgebildeten Gebietes sowie hinsichtlich der Anzeigeleistung ermöglicht. Mögliche Eingangsdaten sind neben 3D-Punkten auch Linienelemente zur Erfassung von Bruchkanten sowie Polygone als Grenzen der Untersuchungsgebiete bzw. zur Abgrenzung von Bereichen mit Daten unterschiedlicher Herkunft. Zur Profilgenerierung wurde das GIS-Tool ArcSobek eingesetzt. Dieses Werkzeug wurde im Zuge der Erstellung des Basismodells durch die Firma Björnsen Beratende Ingenieure GmbH entwickelt und zur Durchführung der in diesem Bericht dokumentierten Arbeiten noch einmal geringfügig erweitert (ARGE SOBEK-Elbe 2009, BCE 2017). ArcSobek ist über die BfG verfügbar und wurde der FGG Elbe sowie dem LHW Sachsen-Anhalt zusammen mit dem SOBEK-Modell bereitgestellt (siehe Kapitel 3). Im Weiteren ist die Vorgehensweise zur Aktualisierung der drei Elbe-Zuflüsse erläutert.

#### **2.2.2.1 Schwarze Elster**

Die Grundlage für die geometrische Abbildung der Schwarzen Elster ist ein 2D-Modell des LHW vom März 2011, welches sich von der Mündung in die Elbe bis zur Landesgrenze zu Brandenburg mit einer Gewässerlänge von ca. 30 km erstreckt (LHW Sachsen-Anhalt 2011). Die Geländedaten des Vorlands entstammen einem DGM1 (Rasterweite = 1 m) des LHW von 2009, ergänzt mit Daten eines DGM1 von 2001 sowie 3D-Deichachsen (erhoben 2006 und 2003). Zur Abbildung der Gewässergeometrie wurden Daten einer Profilvermessung vom Sommer 2009 verwendet. Sonderbauwerke wie Brücken und Eisenbahnüberfahrten wurden aus terrestrischen Vermessungen (ebenfalls Sommer 2009) ergänzt. Die Schwarze Elster ist im Vorhersage-Modell von der Mündung bis zum Pegel Löben (ca. 20 km) erfasst. Der gewählte Profilabstand liegt im Mittel bei 200 m.

Die Daten des 2D-Modells wurden im Mündungsbereich in die Elbe durch Landesdaten (DGM1, ALS- vom Februar 2015) erweitert, um die Profilsuren im Anschluss an die Elbe komplett erfassen zu können. Im Bereich Mönchenhöfe wurde zudem mit dem Landes-DGM die linksseitige Rückverlegung des Deiches eingearbeitet, die im 2D-Modell noch nicht enthalten war (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Schwarze Elster, Bereich Mönchenhöfe (Hintergrund oben: © GeoBasis-DE / BKG 2011)

### 2.2.2.2 Mulde

Im Vorhersagemodell für die Elbe ist die Mulde zwischen ihrer Mündung in die Elbe bis zum Pegel Golzern (Gewässer-km 128,4) abgebildet. Oberstrom des Muldestausees (Gewässer-km 43,5 bis 53) verläuft die Grenze zwischen Sachsen-Anhalt zu Sachsen. Beide Länder haben 2D-Modelle der Mulde in ihrem Zuständigkeitsbereich, welche zur Verwendung für die Erstellung des Vorhersagemodells herangezogen wurden. Im Bereich Sachsen-Anhalts stammen die Grundlagen für die Vorlandabbildung aus einem DGM1 des LHW von 2009, die Deichdaten aus Vermessungen von 2012 (LHW Sachsen-Anhalt 2013). Die Gewässerdaten wurden im Rahmen einer Vermessung des Gewässerverlaufs der Hauptmulde und einiger Nebengewässer in den Jahren 2014/2015 erhoben (LHW Sachsen-Anhalt 2015a). Für den sächsischen Abschnitt von der Landesgrenze bis zum Pegel Golzern wurde die Mulde in 4 Teilmodellen übergeben. Die Geländedaten repräsentieren laut Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) den aktuell vorliegenden Ist-Zustand. Die übergebenen 2D-Modelle wurden in ein zusammenhängendes Terrain zur Extraktion der SOBEK-Profile überführt.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt des Geländemodells der Mulde mit Querprofilspuren im Bereich Mulde-km 14 – 18.

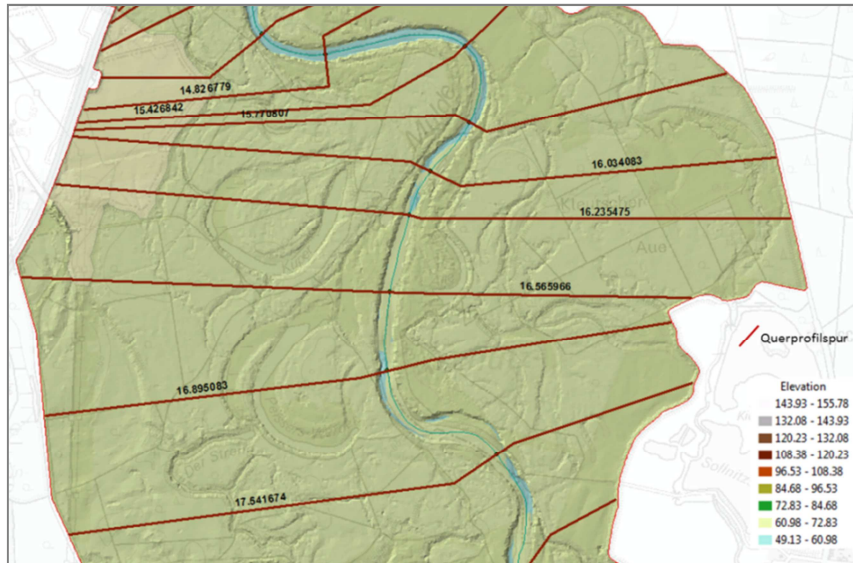


Abbildung 5: Ausschnitt Mulde-Terrain mit Querprofilspuren (Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2015)

Die Festlegung der Querprofilspuren erfolgte nicht äquidistant, da die Mulde in Teilbereichen stark mäandriert, durch einen See und diverse Engstellen verläuft sowie abschnittsweise von Deichen flankiert ist, die bei größeren Ereignissen hinter- und/oder überströmt werden können. Die Profillagen wurden unter Beachtung der Erfassung hydraulisch relevanter Querschnittsveränderungen manuell gewählt, so dass die Abstände der Profile untereinander je nach Gewässercharakteristik zwischen 200 bis hin zu 800 m variieren.

### 2.2.2.3 Saale

Die Saale ist im Vorhersagemodell der Elbe bis zum Pegel Naumburg (Saale-km 163,9) implementiert. Zwischen Saale-km 0,0 und Saale-km 124,2 ist der Fluss Bundeswasserstraße und wird durch mehrere Staustufen (siehe Tabelle 2) geregelt. Zur Modellerstellung / -aktualisierung standen insgesamt sechs 2D-Modelle aus zwei Untersuchungen des LHW Sachsen-Anhalt zum Ober- und Unterlauf der Saale (Grenze bei Saale-km 68) zur Verfügung (LHW Sachsen-Anhalt 2014a, LHW Sachsen-Anhalt 2014b). Grundlage für die Vorlandabbildung waren hier DGM1-Daten des LHW von 2010 und Vermessungsdaten der Deichkronen mit Stand 2011. Die Gewässerbettdaten lagen aus Vermessungen als Querprofile und Uferböschungsoberkanten vor, sowie für den schiffbaren Abschnitt der Saale aus Peilungsdaten der WSD Ost (Übergabe 2012). Für die Wehre und Schleusen wurden ebenfalls durch die WSD Ost Bestandsdaten übergeben (Übergabe 2013). Die Querprofilspuren wurden mit einem mittleren Abstand von 200 m im Lageplan festgelegt und erfassen die abflussrelevante Saaleaue bzw. in eingedeichten Bereichen entsprechend das Gebiet zwischen den Deichen, wie Abbildung 6 exemplarisch für den Bereich zwischen Saale-km 58 und 60 zeigt.

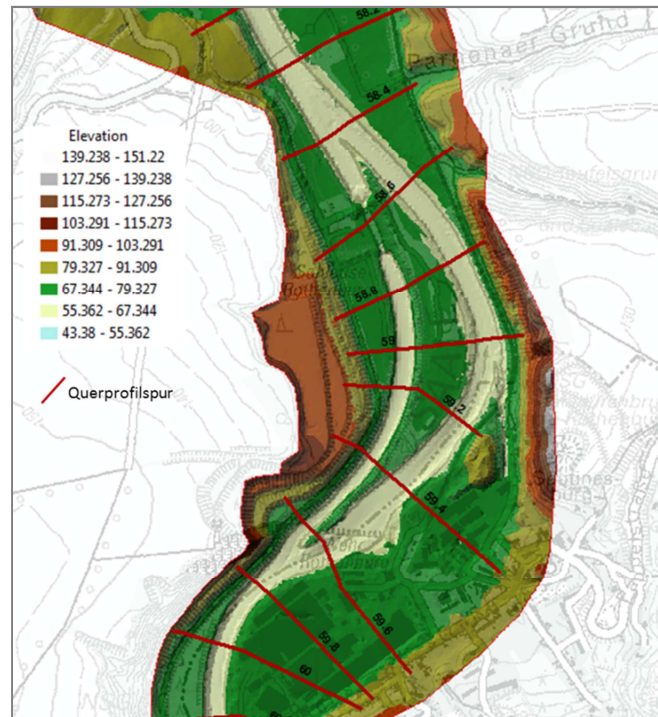


Abbildung 6: Ausschnitt Saale-Terrain mit Querprofilspuren, Bereich Rothenburg (Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2015)

Der im Vorhersagemodell implementierte Abschnitt der Saale ist mit den in nachfolgender Tabelle 2 aufgeführten 18 Wehren staugeregelt. Diese Wehre sind explizit als Bauwerke mit den angegebenen Abmessungen im SOBEK-Modell implementiert. Da die Saale-Wehre bei Hochwasser gelegt bzw. geöffnet werden, sind im Hochwasservorhersagemodell der Elbe sämtliche Saale-Wehre als feste Bauwerke (breitkronige Standardwehre) ohne Steuerung abgebildet. Die Angabe „crest level“ in Tabelle 2 entspricht der Überfallhöhe bei gelegtem bzw. geöffnetem Wehr. Beim Beuditzwehr sowie bei den Wehren Bernburg und Calbe wurden sog. „Compound Structures“ eingesetzt, die es modelltechnisch ermöglichen, mehrere Bauwerke unterschiedlicher Geometrie an einem Ort abzubilden. Sofern zu einem späteren Zeitpunkt oder für erweiterte Modellanwendung eine Steuerung der Saalewehre erforderlich ist, kann diese recht einfach ergänzt werden. Hierbei ist allerdings – zumindest im Kontext der operationellen Modellanwendung – der Aspekt der Rechenzeit zu beachten.

Die Saale-Zuflüsse Weiße Elster, Wipper und Bode werden, wie im bestehenden WAVOS-1D – Modell, jeweils als lateraler Zufluss angesetzt, ebenso die Pleiße als bedeutender Zufluss in die Weiße Elster. Entsprechend der mittleren Fließzeit vom jeweiligen Pegel bis zur Einmündung in die Saale wird dabei ein zeitlicher Versatz berücksichtigt. Die Fließzeiten wurden aus einem Schema des Gewässernetzes der Elbe mit Angabe von Fließzeiten in den verschiedenen Gewässerabschnitten bei einem mittleren Hochwasser ermittelt (LHW Sachsen-Anhalt 2014c). Sowohl bei kleineren als auch bei größeren Ereignissen können diese Fließzeiten z.T. deutlich von diesen Werten abweichen. Für den Standardbetrieb des Hochwasser-Vorhersagemodells stellen sie jedoch eine gute Näherung dar. Im Zuge der Modellkalibrierung wurden die Werte noch einmal angepasst und letztlich wie folgt implementiert:

- Pegel Zeitz / Weiße Elster: 11 Stunden
- Pegel Böhlen / Pleiße: 7 Stunden
- Pegel Großschießstedt / Wipper: 2 Stunden
- Pegel Hadmersleben / Bode: 7 Stunden

Da diese zeitlichen Verschiebungen ausschließlich die genannten Zuflussrandbedingungen und nicht die Modellparametrisierung selbst betreffen, sind sie nicht unmittelbarer Teil des hydraulischen Modells, sondern für den operationellen Betrieb innerhalb des Vorhersagesystems definiert. Entsprechend können diese Abschätzungen bei Bedarf angepasst werden, ohne dass dies einen Eingriff in das eigentliche Vorhersagemodell erfordern wird.

Tabelle 2: Wehre Saale (Quelle: Wasserstraßendatenbank der WSV)

Name	Fluss-km	Art Verschlusskörper	Breite [m]	Wehrhöhe [m NHN]
Öblitzwehr	151.5	k.A.	105	98.25
Beuditzwehr	144	k.A.	80 / 38	96.7 / 97.45
Brückenmühle	143.2	k.A.	101	95.92
Herrenmühle	141.48	k.A.	157	94.48
Bad Dürrenberg	126.21	k.A.	100	88.5
Rischmühle	115.2	festes Wehr	92	85.95
Meuschau	113.5	festes Wehr	111	83.11
Planena	104.4	Drucksegment	17.5	82.50
Böllberg	95.88	festes Wehr	96	77.00
Pulverweiden	94.55	Drucksegment	17.5	76.32
Halle-Stadt	93.64	festes Wehr	38	75.40
Gimritz	92.55	festes Wehr	85	74.41
Kröllwitz-Trotha	89.44	festes Wehr	105	73.25
Wettin	70.4	festes Wehr	111	69.56
Rothenburg	58.7	festes Wehr	165	66.93
Alsleben	50.3	festes Wehr	190	64.00
Bernburg Überfallwehr	36.1	festes Wehr	136	59.50
Bernburg Schützenwehr	36.1	Schütz	4.5	59.99
Calbe WKA	20.0	Fischbauchklappe	26	55.50
Calbe Überfallwehr	20.0	festes Wehr	151	55.53

### 2.3 Erweiterung des Basismodells

Das in Kapitel 2.1 beschriebene SOBEK-Basismodell unterscheidet sich in seiner räumlichen Ausdehnung in mehreren Bereichen vom WAVOS-1D - Modell und deckt nicht sämtliche, für die operationelle Vorhersage erforderlichen Gewässerabschnitte ab. Folglich galt es neben der Aktualisierung das Modell auch dementsprechend zu erweitern. Die erforderliche Erweiterung betraf einerseits den Bereich der Tideelbe unterstrom vom Wehr Geesthacht (Kapitel

2.3.1) sowie die Rückstaubereiche kleinerer Elbezuflüsse (Kapitel 2.3.2). Die Modellerweiterung in Kombination mit der Aktualisierung ist bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

### 2.3.1 Modellerweiterung Tideelbe: Geesthacht bis Zollenspieker

Das SOBEK-Basismodell endet im Unterwasser des Wehrs Geesthacht, welches bei normalen Abfluss- und Wasserstandsverhältnissen die Grenze des Tideeinflusses in der Elbe darstellt. Bei höheren Sturmfluten oder Binnenhochwassern wird das Wehr Geesthacht jedoch gelegt und der Tideeinfluss kann sich auch über das Wehr hinaus bis in den Bereich der oberstrom gelegenen Vorhersagepegel (Geesthacht, Hohnstorf, Boizenburg) auswirken. Um den Tideeinfluss auf die Abflussverhältnisse in der Binnenelbe in der Vorhersage abbilden zu können, war es erforderlich, das SOBEK-Basismodell bis zum Pegel Zollenspieker (Elbe-km 598,2) zu verlängern (BfG 2017). Auch das bisher eingesetzte Hochwasservorhersagemodell endet am Pegel Zollenspieker, allerdings wird aus Gründen der Rechenzeiten im WAVOS-1D-Modell bisher auf eine künstliche Wasserstand-Abfluss-Beziehung als untere Modellrandbedingung zurückgegriffen (Burek & Rademacher 2007). Dieses Konstrukt ist für das aktuelle SOBEK-Modell nicht erforderlich und es wird mit gemessenen bzw. durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) vorhergesagten Tidewasserständen als untere Modellrandbedingung gerechnet (siehe Kapitel 2.3.1.3).

#### 2.3.1.1 DGM-Daten Tideelbe

Zur Erstellung des digitalen Geländedatensatzes als Basis der Profileableitung für das SOBEK-Modell lag als Grundlage ein DGM-W der Tide- und Außenelbe vor (BfG 2011). Eine Übersicht des hier verwendeten DGM-W mit Querprofilspuren zwischen den Pegeln Geesthacht (Elbe-km 583,4) und Zollenspieker (Elbe-km 598,2) zeigt Abbildung 7.



Abbildung 7: Übersicht DGM Tideelbe, Pegel Geesthacht bis Pegel Zollenspieker, oben links: Foto des Pegels Zollenspieker, unten Mitte: Detail im Bereich des Wehrs Geesthacht

Die Vorlanddaten entstammen einer LIDAR-Aufnahme vom Frühjahr 2010, ergänzt durch Daten aus einer nachträglichen Befliegung im Frühjahr 2011. Für die Gewässerbett-Abbildung wurden Peilungsdaten aus dem Zeitraum Dezember 2006 bis Mai 2011 verwendet.

### 2.3.1.2 Implementierung Wehr Geesthacht

Da die untere Modellgrenze des Basismodells auf dem Wehr Geesthacht liegt, ist das Bauwerk selbst dort nicht explizit enthalten und war entsprechend zu ergänzen. Das Stauwehr besteht aus einem 4-feldrigen Sektorenwehr, mit einer Sektorenbreite von jeweils 50 m lichter Weite. Gemäß Planfeststellung wurde das zulässige Stauziel am oberwasserseitigen Pegel auf NHN + 4,00 m festgelegt. Die Abflussleistung des Wehrs bei Normalstau beträgt ca. 1.200 m<sup>3</sup>/s. Bei Überschreitung dieses Abflusses in der Binnenelbe (maßgebend ist der Pegel Neu-Darchau) sind deshalb alle verfügbaren Sektoren in Tiefstlage zu fahren (Wehrschwelle + 1,30 m NHN) und der Wasserstand wird nicht mehr vom Wehr geregelt. Bei Sturmfluten von unterstrom senken sich die Sektoren selbsttätig in die Sektorgruben ab. Im SOBEK-Modell ist das Wehr als vierfeldriges Flusswehr („Compound Structure“) abgebildet, wobei die 4 Sektoren getrennt gesteuert werden können. Der Detaillierungsgrad der modelltechnischen Berücksichtigung des Wehrs Geesthacht geht damit auch über den im aktuellen WAVOS-1D – Modell gewählten Umfang hinaus. Die Kronenbreite beträgt je Sektor 50 m mit einer Wehrschwelle auf 1.3 m NHN und einer maximalen Wehroberkante auf 5,65 m NHN. Zusätzlich zu den 4 Wehrsektoren ist die Fischaufstiegsanlage – die derzeit größte Anlage Europas – als ungesteuertes Überfallwehr mit einer Breite von 16 m vereinfacht implementiert.

Für den operationellen Modellbetrieb wurde in Abstimmung mit dem LHW folgende modellinterne Steuerung definiert: Im hydrologischen Normalfall (Durchfluss am Pegel Neu Darchau kleiner 1.200 m<sup>3</sup>/s) greift ein automatischer Steuerungsmechanismus, der die Überfallhöhen der Sektoren so einstellt, dass der planfestgestellte Wasserstand von 4 m NHN im Oberwasser der Staustufe gehalten wird. Sobald der Durchfluss am Pegel Neu Darchau 1.200 m<sup>3</sup>/s übersteigt, übernimmt der ebenfalls automatisierte Steuerungsmechanismus für den Hochwasserfall und die Sektoren werden in Abhängigkeit des steigenden Abflusses in Neu Darchau sukzessive abgesenkt. Im Modell wird hierbei, basierend auf Auswertungen verfügbarer Daten zur realen Sektorensteuerung (für das Hochwasser 2013 sowie ab Februar 2014) für jeden Sektor eine individuelle Steuerung definiert. Diese Werte sind, falls eine Anpassung erforderlich ist, außerhalb der Vorhersageumgebung durch die Mitarbeiter Modellpflege und -support editierbar. Die Absenkung der Sektoren erfolgt entsprechend der Fließzeit vom Pegel Neu Darchau bis zum Wehr Geesthacht mit einer zeitlichen Verzögerung von 24 h. Im Fall einer Sturmflut, die zur vollständigen Absenkung der Sektoren führt, oder nicht vorhersehbarer Steuerungen einzelner oder sämtlicher Sektoren besitzt der Anwender die Möglichkeit, die automatische Steuerung individuell für jeden Sektor zu deaktivieren, und die Wehrstellungen dort manuell vorzugeben. Dies wird durch die Oberfläche des WAVOS-Vorhersagesystems unterstützt (siehe Kapitel 7). Da es kein festes Kriterium für die Steuerung des Wehre Geesthacht im Fall einer Sturmflut gibt, konnte für diesen Fall entsprechend auch keine automatisierte Steuerung im Modell eingebaut werden. Die Entscheidung wird situativ mit relativ kurzem zeitlichem Vorlauf getroffen. Entsprechend hat in solchen Situationen die Vorhersagezentrale einen entsprechenden Informationsaustausch mit dem Bauwerksbetreiber, der WSV, in seinen Vorhersageprozess zu integrieren. Abbildung 8 stellt die Umsetzung der verhältnismäßig komplexen Steuerungsoptionen am Wehr Geesthacht im Vorhersagemodell schematisch dar.



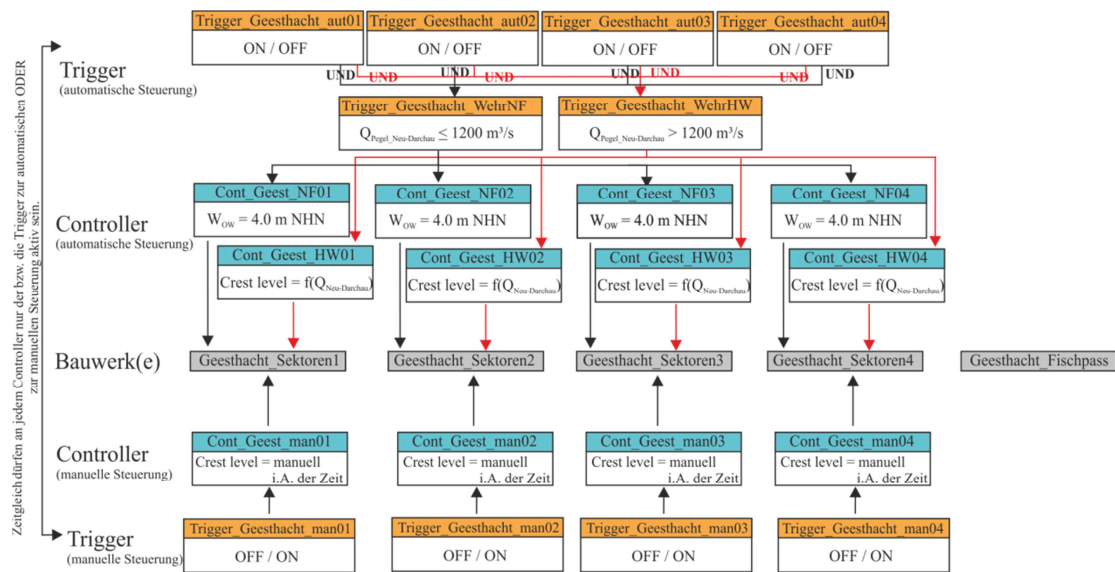


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Implementierung des Wehrs Geesthacht im Vorhersagemodell (Bauwerk + Regler / Controller + Schalter / Trigger)

Für das Hochwasserereignis 2013 wurde zu Testzwecken die exakte Wehrsteuerung der 4 Sektoren angesetzt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung bei Kontrolle am Pegel Geesthacht. Für die übrigen betrachteten Ereignisse zur Modellkalibrierung (siehe Kapitel 4.1) lagen keine Aufzeichnungen der Wehrstellungen vor, so dass in diesen Fällen auf die automatische Steuerung im Modell zurückgegriffen wurde. Die Ergebnisse (siehe Kapitel 4.3) zeigen jedoch, dass auch für diesen Fall eine hinreichend genaue Abbildung der Wasserstände oberstrom des Wehrs erzielt werden kann.

### 2.3.1.3 Untere Randbedingung am Pegel Zollenspieker

Die untere Randbedingung des aktualisierten SOBEK-Modells bilden die Wasserstände am Pegel Zollenspieker. Für die Modellkalibrierung und Validierung kann durchgängig auf Messdaten zurückgegriffen werden. Gleiches gilt im operationellen Betrieb für den Updatezeitraum. Für den jeweils in der Zukunft liegenden Vorhersagezeitraum stehen vorhergesagte Wasserstände des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung. Diese automatisiert auf Basis des MOS-Verfahrens (MOS = Model Output Statistics, Müller-Navarra & Knüpffer 2010) mehrfach täglich erstellten Vorhersagen können mit einem von der BfG erstellten und dokumentierten Konvertierungsskript (geschrieben in der Software R) in ein klassisches Zeitreihenformat („WAVOS-Format“) umgewandelt werden. Abbildung 9 stellt gemessene und vorhergesagte Wasserstandsdaten am Pegel Zollenspieker für den Vorhersagezeitpunkt 15. Juni 2018, 06:00 Uhr in der Vorhersageoberfläche WAVOS dar. Folgende Aspekte gilt es beim operationellen Betrieb zu beachten:

- Die aktuelle Vorhersagelänge der BSH-Vorhersagen für den Pegel Zollenspieker liegt bei 6 Tagen. Entsprechend sind für die letzten beiden Tage des 8-tägigen Vorhersagezeitraums an der Elbe keine externen Vorhersagen verfügbar und der Nutzer muss den Wasserstandsverlauf für den Modellbetrieb händisch sinnvoll wählen. Das Vorhersagesystem WAVOS geht zunächst davon aus, dass der letzte verfügbare Wert

der BSH-Vorhersage konstant über den verbleibenden Vorhersagezeitraum verläuft. Eine mögliche Option für die Zukunft wäre es beispielsweise, die jeweils aktuelle BSH-Vorhersage mit dem vorausberechneten astronomischen Tideverlauf zu kombinieren.

- Im hydrologischen Normalfall, wenn das Wehr Geesthacht das Stauziel von 4 m hält, sind die Vorgaben für den Pegel Zollenspieker nicht sensitiv für die Vorhersageergebnisse entlang der Binnenelbe. Dies bedeutet, dass nur bei gelegtem Wehr Geesthacht die gemessenen und vorhergesagten Wasserstände des Pegels Zollenspieker einen Einfluss auf die Vorhersagen besitzen.
- Derzeit handelt es sich bei den genutzten BSH-Vorhersagen am Pegel Zollenspieker um automatisch generierte Vorhersagen; etwaige manuelle Anpassungen durch die diensthabenden Wissenschaftler des BSH sind hierin aktuell noch nicht verfügbar.

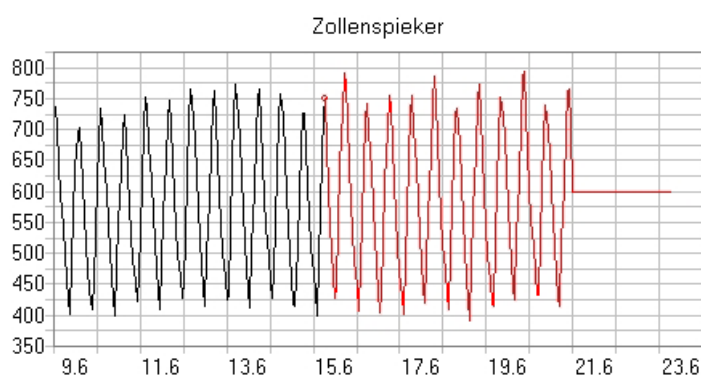


Abbildung 9: Darstellung der Wasserstände am Pegel Zollenspieker zwischen dem 09.06. und dem 23.06.2018 (schwarz: Messdaten, rot: Vorhersage des BSH, verlängert um 2 Tage)

## 2.3.2 Modellerweiterung im Rückstaubereich kleinerer Nebengewässer

Im neuen Hochwasservorhersagemodell sind neben Schwarze Elster, Mulde, Saale und Havel auch kleinere Nebengewässer vereinfacht erfasst. Von diesen ist zwar im Hochwasserfall kein maßgeblicher Zufluss zur Elbe zu erwarten und dementsprechend existieren für sie auch keine operationellen Zuflussvorhersagen, ihre Mündungsbereiche lassen jedoch infolge des Rückstaus eine Retentionswirkung und damit einen Einfluss auf den Verlauf von Elbehochwassern erwarten (BfG 2017). Bei den Elbezuflüssen, deren Mündungsbereiche als potentielle Retentionsräume im Vorhersagemodell vereinfacht berücksichtigt werden, handelt es sich um Ohre, Tanger, Aland, Jeetzel und Stepenitz (siehe nachfolgende Kapitel).

### 2.3.2.1 Ohre

Die Parametrisierung der Ohremündung (Elbe-km 350,4) als Retentionsraum im Vorhersagemodell erfolgte in Zusammenarbeit mit dem LHW, der auf Basis einer Geländemodellauswertung eine Wasserstands-Volumen-Beziehung zur Verfügung stellte. Diese berücksichtigt drei verschiedene Rückhalteräume, welche in Abhängigkeit des Wasserstandes wirken. Zunächst ist lediglich der eingedeichte Flusslauf der Ohre als Rückhalteraum für Elbewasser verfügbar, während mit steigenden Wasserständen in der Elbe nach Überflutung des Teilschutzdeiches (Sommerdeich Loitsche) und später auch des linken Ohrehauptdeichs

weitere Volumina erschlossen werden. Abbildung 10 (links) stellt die potentiellen Retentionsbereiche im Mündungsbereich der Ohre sowie die wasserstandsabhängige Entwicklung der Retentionsfläche (Abbildung 10, rechts) dar.

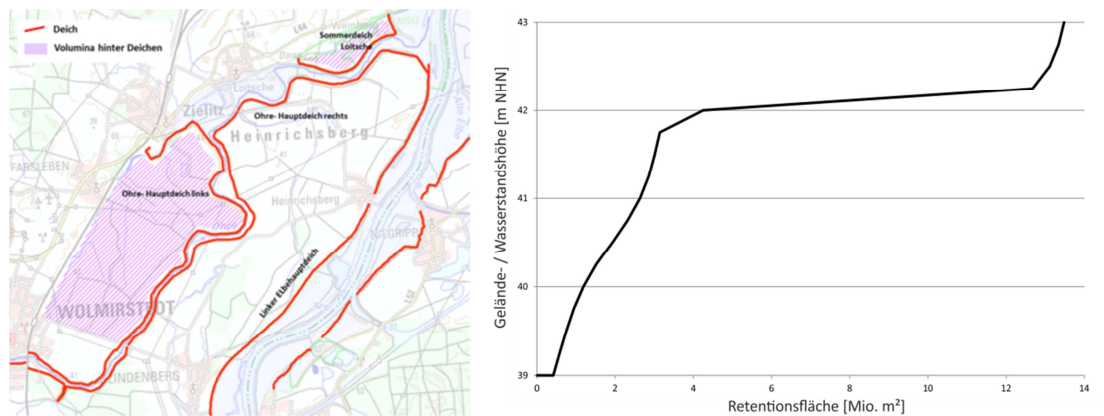


Abbildung 10: Lageplan des Ohremündungsbereichs bis Wolmirstedt, Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2015 (links), höhenabhängige Retentionsfläche im Vorhersagemodell im Bereich der Ohremündung (rechts)

### 2.3.2.2 Tanger

Der Tanger mündet über den Hafen Tangermünde bei Kilometer 388,3 in die Elbe. Zur Ermittlung des zur Verfügung stehenden Retentionsraums der Tangerniederung konnte auf eine Studie im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt aus dem Jahr 2015 zur Überprüfung der Zu- und Abflussverhältnisse in der Tangerniederung zurückgegriffen werden (IWUD 2015), in der neben einer Konzeption für eine mögliche gesteuerte Rückhaltung auch die aktuellen Verhältnisse betrachtet wurden. Der Tanger kann über das Hafendeich gegen die Elbe abgeriegelt werden. Die Schließung erfolgt im derzeitigen Zustand, wenn der Tanger durch Rückstau der Elbe bereits bordvoll ist und die Wasserstandsvorhersage für den Pegel Tangermünde unter 640 cm bleibt. Wird dieser Wert (voraussichtlich) überschritten, bleibt das Wehr geöffnet, um Wasser in die Tangerniederung einströmen zu lassen und die Hochwassersituation in der Elbe zu entspannen. Im Ist-Zustand beginnt gemäß (IWUD 2015) die Überströmung des Onkel-Toms-Hütte-Deiches an der Überlaufschwelle in der Nähe des Hafendeichs ab ca. 630 cm am Pegel Tangermünde. Ab ca. 650 cm kommt es dann auch auf größeren Deichabschnitten zur Überströmung. Modellintern wurde die Retentionswirkung der Tangerniederung vereinfacht analog zur Ohremündung (Kapitel 2.3.2.1) in Form einer höhen- bzw. wasserstandsabhängigen Retentionsfläche (siehe

Abbildung 11, rechts) berücksichtigt. Um eine in Zukunft möglicher Weise gesteuerte Rückhaltung im Bereich der Tangerniederung mit geringem Aufwand in das Vorhersagemodell übertragen zu können, wurde das Hafendeich bereits im Modell als bewegliches Bauwerk implementiert. Die aktuell hinterlegte Steuerung dieses Wehrs erfolgt modellintern, wobei das Wehr bei Überschreitung eines Wasserstands von 630 cm am Pegel Tangermünde geöffnet und der Retentionsraum aktiviert wird.

Abbildung 11 (links) stellt die potentiellen Retentionsbereiche im Mündungsbereich des Tangers sowie die wasserstandsabhängige Entwicklung der Retentionsfläche (

Abbildung 11, rechts) dar.

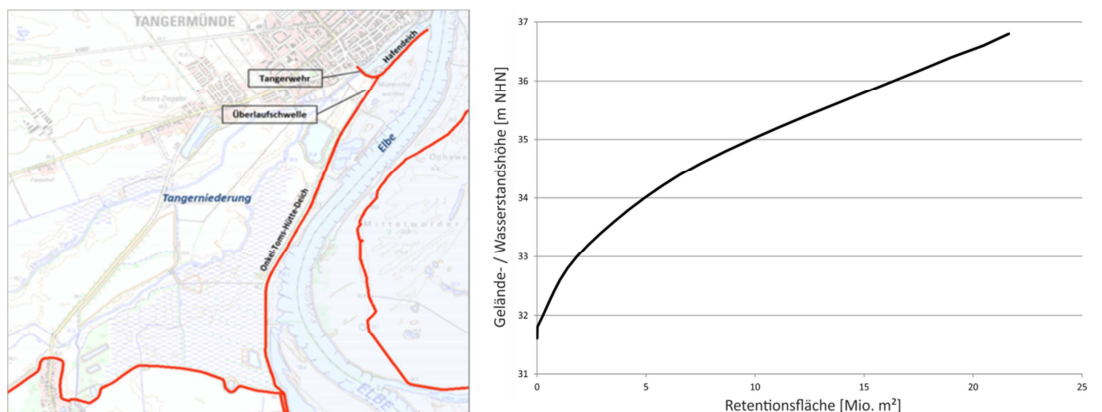


Abbildung 11: Lageplan der Tangermündung, Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2015 (links),  
höhenabhängige Retentionsfläche im Vorhersagemodell im Bereich der Tangermün-  
dung (rechts)

### 2.3.2.3 Stepenitz

Der Unterlauf der Stepenitz wurde vereinfacht als Rückhalteraum im Vorhersagemodell berücksichtigt. Hier kann die Elbe bei Hochwasser in das Gewässer rückstauen. Durch Bahn und Straßen in Dammlage besteht Potenzial zur Rückhaltung, welches im Vorhersagemodell am Profil km 454,8 (Mündung der Stepenitz in die Elbe) als Retentionsraum implementiert wurde.

### 2.3.2.4 Aland

Die Berücksichtigung des Aland-Mündungsbereiches (Elbe-km 474,4) als Rückhalteraum ist im Vorhersagemodell über eine entsprechende Ausdehnung der Elbe-Querprofilspuren bis zum Wischedeich realisiert (Abbildung 12). Zukünftig ist die Inbetriebnahme eines Überleitungsbauwerkes geplant, welches bei geschlossenem Alandabschlussbauwerk nachströmendes Eigenwasser des Alands in das Gewässersystem der Seege erlaubt. Ggf. sind diese zusätzlichen Abflussmengen, die dann über die Seege in die Elbe gelangen, zukünftig bei der Hochwasservorhersageberechnung zu berücksichtigen. Aufgrund der vorgesehenen Überleitung wird auf die Implementierung des Alandflussschlauches oberstrom des Abschlussbauwerkes verzichtet.

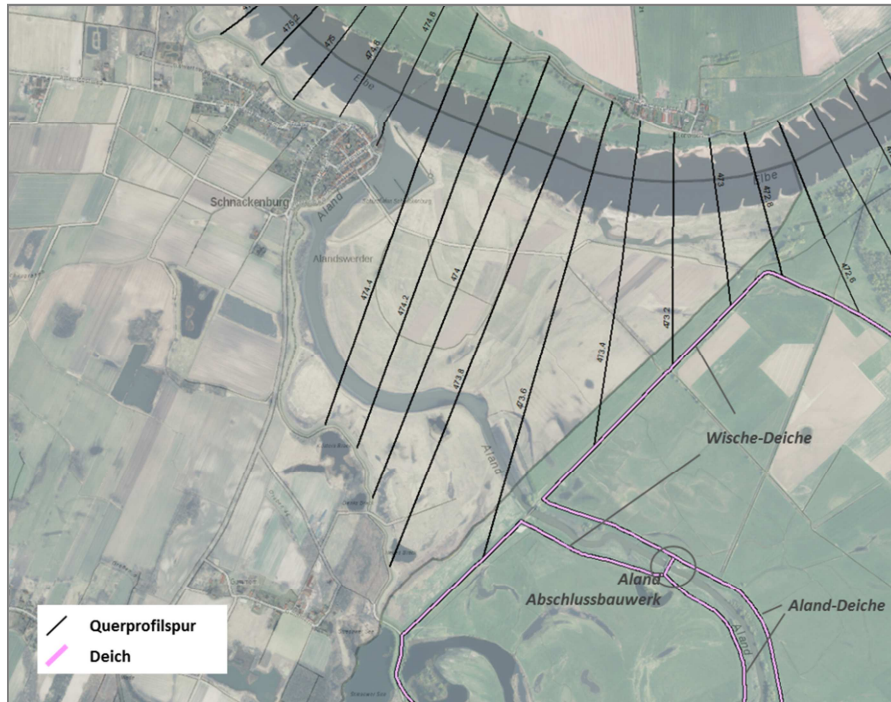


Abbildung 12: Aland-Mündungsbereich bei Schnackenburg, Hintergrund: © GeoBasis-DE / BKG 2011

### 2.3.2.5 Jeetzel

Die Jeetzel mündet bei Hitzacker in die Elbe und kann bei Elbehochwasser über ein Mündungssperrbauwerk gegen Rückstau aus der Elbe abgeriegelt werden. Zur Entlastung von Eigenwasser können über ein Schöpfwerk mit 3 Pumpen maximal 60 m<sup>3</sup>/s Wasser aus der Jeetzel in die Elbe abgeschlagen werden (NLWKN 2011). Da der Einfluss dieser maximal möglichen Wassermenge auf den Hochwasserverlauf entlang der Elbe vernachlässigbar ist, wird auf die Berücksichtigung der Pumpwassermenge im Hochwasservorhersagemodell verzichtet.

## 2.4 Implementierung Havel – Havelsteuerung

Die Havel bzw. die Untere Havel-Wasserstraße (UHW) ist von ihrer Mündung in die Elbe über den Gnevsdorfer Vorfluter bis zum Pegel Rathenow UP (UHW-km 103,94) im SOBEK-Modell (genau wie im bestehenden WAVOS-1D-Modell) abgebildet. Auf diesen ca. 60 km Flusstrecke gibt es hinsichtlich der Bauwerke, die mitunter auch nachhaltig den Hochwasserablauf entlang der Elbe beeinflussen, einige Besonderheiten, die in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben sind.

Abbildung 13 stellt das Modellnetz der Havel im Vorhersagemodell einschließlich der bedeutsamen Bauwerkselemente (Wehre und Polder) dar.

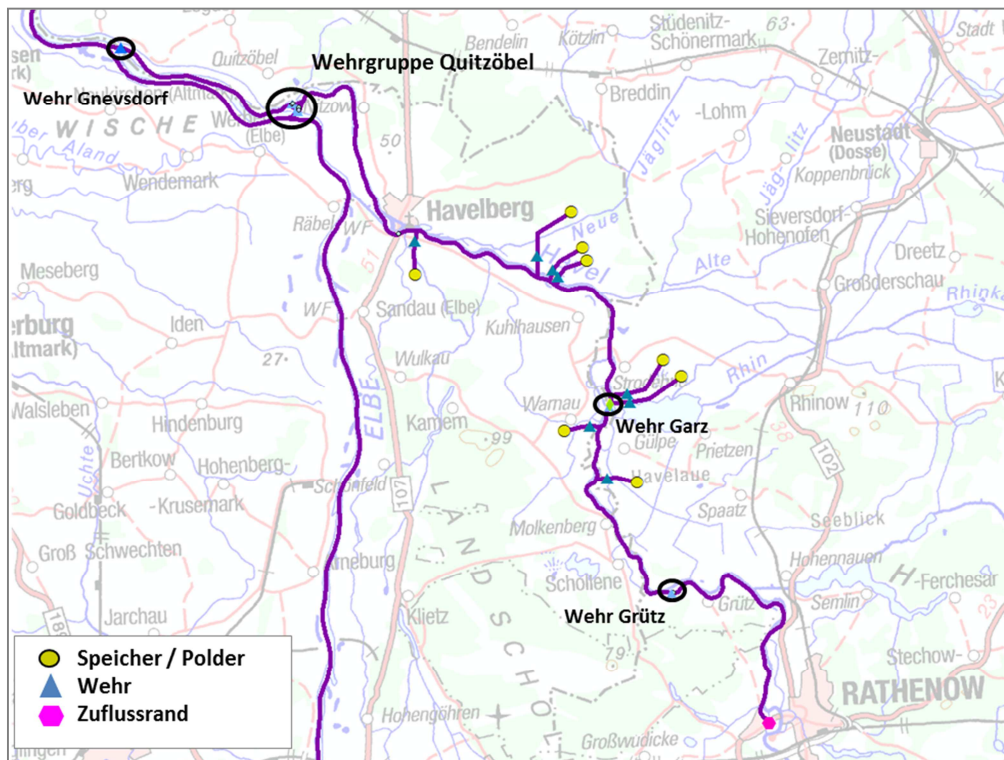


Abbildung 13: Modellnetz der Havel / Unteren Havel-Wasserstraße (Hintergrund: © WMS-Dienst Top. Karten (ITZ Bund))

### 2.4.1 Wehre Garz und Grütz

Die beiden auf diesem Havelabschnitt gelegenen Havelwehre Grütz (UHW-km 117,5) und Garz (UHW-km 128,85) sind im SOBEK-Modell implementiert. Beide Wehranlagen bestehen jeweils aus einem kleinen Schützenwehr und einem deutlich breiteren Nadelwehr, welche modellintern jeweils zu einem Wehr mit der entsprechenden Gesamtbreite zusammengefasst wurden. Die Wehre Garz und Grütz werden modellintern zeitabhängig auf ihr jeweiliges Sommer- und Winterstauziel gesteuert (siehe Abbildung 14). Im aktuellen Modell sind die entsprechenden Zeitreihen bis 2100 hinterlegt. Die Stauzielbestimmungen können bei Bedarf im Modell angepasst bzw. ergänzt werden.

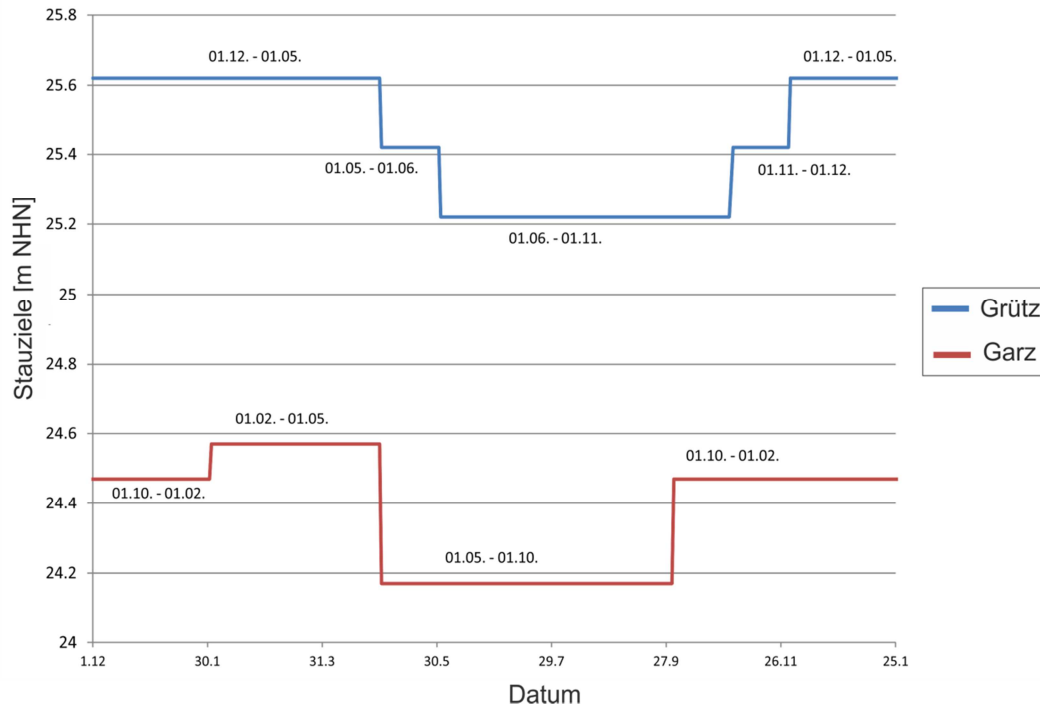


Abbildung 14: Jahreszeitabhängige Stauziele der Havelwehre Garz und Grütz

## 2.4.2 Havelpolder

Die Flutpolder an der Havel (siehe Tabelle 3) sind über Wasserstands-Volumen-Beziehungen im SOBEK-Modell implementiert. Sie befinden sich im Nebenschluss zur Havel und sind jeweils über ein „künstliches“ (in der Realität nicht vorhandenes) Bauwerk / Wehr an die Havel angeschlossen und können über diese gefüllt und wieder entleert werden. Diese Bauwerke sind standardmäßig geschlossen, können jedoch vom Modellanwender (auch über die Vorhersageoberfläche des Systems WAVOS, siehe Kapitel 7) geöffnet werden.

Weitere Details zur Abbildung der Havelpolder im SOBEK-Modell können den im Rahmen des EU-Projekts LABEL durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Flutung der Havelniederung auf Elbehochwasser entnommen werden (BfG 2011b).

Tabelle 3: Im Vorhersagemodell implementierte Flutpolder an der Havel

Lage (Havel-km)	Polder-Nr.	Polder	Gewässerseite	max. Retentionsfläche [ha]
Havel-km 125,2	6	Großer Graben	rechts	2.500
Havel-km 127,8	5	Warnau	links	830
Havel-km 129,1	4.1	Scharfhorst	rechts	910
Havel-km 129,4	4.2	Twerl	rechts	2.500
Havel-km 136,8	3.2	Flöthgraben	rechts	1.100
Havel-km 137,2	3.1	Vehlgast	rechts	900
Havel-km 137,8	2	Kümmernitz	rechts	450
Havel-km 144,4	1	Trübengraben	links	1600

### 2.4.3 Wehrgruppe Quitzöbel und Gnevsdorfer Wehr

Zum Schutz der Havelniederung vor Hochwasser der Elbe und zur Kappung des Hochwasserscheitels der Elbe wurde an der unteren Havel ein komplexes Hochwasserschutzsystem erstellt, das neben den Havelpoldern (siehe Kapitel 2.4.2) aus dem Einlasswehr bei Neuwerben, den Wehren Quitzöbel sowie dem Mündungswehr Gnevsdorf besteht (siehe Abbildung 13). Das Zusammenspiel der Bauwerke im Fall einer Entlastung der Elbe bei Hochwasser in die Wasserstraße und die Havelniederung bzw. in die Polder hinein, ist ausführlich im Zwischenbericht (BfG 2017) dargestellt, so dass sich an dieser Stelle auf die Umsetzung im Hochwasservorhersagemodell fokussiert wird.

Die besondere Herausforderung in der Modellierung liegt darin, dass einerseits außerhalb von extremen Hochwasserereignissen der Zufluss der Havel in die Elbe modellintern hydrodynamisch simuliert werden soll. Im Fall der Entlastung der Elbe bei Hochwasser sowie der anschließenden Entlastung der Havelniederung nach Durchgang der Hochwasserwelle soll jedoch im selben (!) Modell die extern ermittelte Kappungsganglinie integriert werden. Dies bedeutet, dass in diesem Fall die modellinterne Simulation der Elbe-Havel-Interaktion deaktiviert werden muss. Diese Anforderung macht eine Implementierung der in Abbildung 15 dargestellten (und z. T. fiktiven) Bauwerke und Verzweigungen erforderlich.

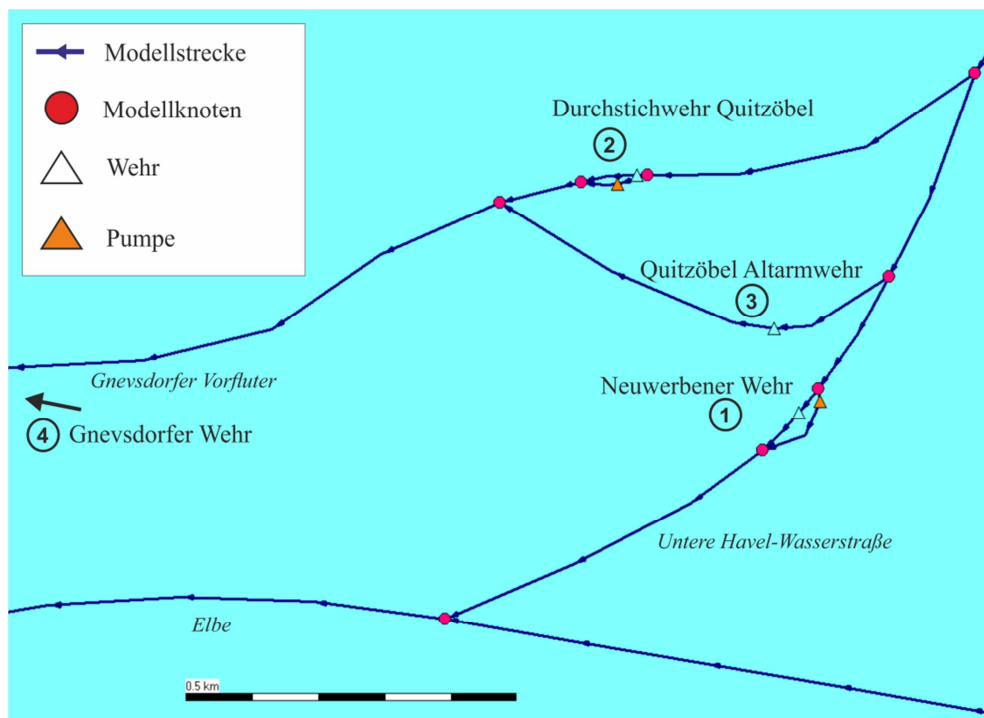


Abbildung 15: Struktur des Hochwasservorhersagemodells im Bereich der Wehrgruppe Quitzöbel

Das komplexe Zusammenspiel der Wehrgruppe Quitzöbel (Nummer 1, 2, 3 in Abbildung 15) einschließlich des Gnevsdorfer Wehrs (Nummer 4 in Abbildung 15) ist im SOBEK-Modell vereinfacht, auf die Belange im operationellen Hochwasservorhersagebetrieb abgestimmt, implementiert. Dabei besitzt der Modellanwender die Möglichkeit bzw. die Verpflichtung in die Steuerung der Bauwerke einzugreifen bzw. diese zu initiieren. Auch wenn versucht wur-



de, die Komplexität des Vorhersagemodells soweit möglich zu reduzieren, erfordert der Modellbetrieb in diesem Abschnitt ein vertieftes Verständnis der realen Prozesse und ihrer modellinternen Nachbildung. Hinzu kommt, dass sich die einzelnen Bauwerke mitunter gegenseitig beeinflussen. In den Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 ist die reale Steuerung der im SOBEK-Modell implementierten Steuerung gegenübergestellt:

Im hydrologischen Normalfall an der Elbe bzw. zur Niedrigwasseraufhöhung verhalten sich mit Ausnahme des Neuwerbener Wehrs die Bauwerke im Modell entsprechend der Realität (siehe Tabelle 4). Im Vorhersagemodell bleibt das Neuwerbener Wehr komplett geschlossen, so dass der Abfluss aus der Havel ausschließlich über den Gnevsdorfer Vorfluter in die Elbe geleitet wird. Das Durchstichwehr regelt bei Normalwasserführung die Einhaltung des Stauziels für Havelberg. Im Modell erfolgt die Steuerung in diesem Fall also auf Sommer- bzw. Winterstauziel für den Havel-Pegel Havelberg-Stadt (UHW-km 145,3).

Das Altarmwehr Quitzöbel ist aufgrund von Rekonstruktionsarbeiten gegenwärtig geschlossen. Da ein Zeitpunkt zur Wiederinbetriebnahme zum Zeitpunkt der Modellerstellung nicht feststand, wurde das Wehr zwar in das Modell implementiert, ist jedoch als dauerhaft geschlossen angesetzt. Nach Abschluss der Arbeiten und Wiederinbetriebnahme des Wehrs kann die dann geltende Steuerungsregel im Modell implementiert werden.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel außerhalb von Hochwasserereignissen

	<b>Realität</b>	<b>Modell</b>
Neuwerbener Wehr	geschlossen	geschlossen; kann manuell geöffnet werden
Durchstichwehr	wenig geöffnet (Mindestabfluss)	geöffnet, Stauzielregelung
Altarmwehr	geschlossen	geschlossen
Gnevsdorfer Wehr	wenig geöffnet (Mindestabfluss)	geöffnet, Stauzielregelung

Im Fall der Elbescheitelkappung wird über das Wehr Neuwerben Elbewasser in die Havelniederung eingeleitet. Die Entlastungsmenge und der zeitliche Verlauf der Einströmung werden mit Hilfe des sog. Kappungsmodells ermittelt. Damit am Wehr Neuwerben im Vorhersagemodell diese, in der Koordinierungsstelle vereinbarte und von den Fachministern der beteiligten Länder genehmigte Ganglinie auch in der operationellen Vorhersage berücksichtigt werden kann, ist ein künstliches Konstrukt erforderlich. Bei geschlossenem Wehr Neuwerben werden mit Hilfe einer Pumpe im SOBEK-Modell die Abflüsse der Kappungsganglinie aus der Elbe in die Havel geleitet. Die hydrodynamische Modellierung der Elbe-Havel-Interaktion wird somit quasi „ausgeschaltet“. Die übrigen Wehre werden entsprechend der realen Verhältnisse gesteuert (siehe Tabelle 5). Die Eingabe der Kappungsganglinie ist (mit technischer Unterstützung des Vorhersagesystems) vom Modellanwender vorzunehmen. Gleiches gilt für die Steuerung der übrigen Bauwerke.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel während der Elbescheitelkappung

	<b>Realität</b>	<b>Modell</b>
Neuwerbener Wehr	geöffnet	geschlossen, aber Pumpe im Modell ermöglicht den Zufluss zur Havelniederung gemäß Kappungsmodell
Durchstichwehr	geschlossen	geschlossen
Altarmwehr	geschlossen	geschlossen
Gnevsdorfer Wehr	geöffnet	geöffnet

Nach Durchgang der Hochwasserwelle in der Elbe erfolgt nach festgelegten Kriterien die Entlastung des in der Havelniederung zwischengespeicherten Wassers in die Elbe. Das Wehr Neuwerben wird dazu wieder geschlossen und das Durchstichwehr geöffnet. Dabei darf nur so viel Wasser in die Elbe abfließen, dass es bezogen auf den Pegel Wittenberge nicht zu einem Wiederanstieg des Wasserstandes in der Elbe unterstrom der Havelmündung kommt. Die entsprechend mögliche Wassermenge wird ebenfalls von der Koordinierungsstelle festgelegt und das Durchstichwehr entsprechend gesteuert. Modelltechnisch wird ähnlich wie im Fall der Elbescheitelkappung verfahren: eine parallel zum Durchstichwehr Quitzöbel angeordnete Pumpe führt das Wasser gemäß vorgegebenem zeitlichen Verlauf aus der Havel in Richtung Elbe ab. Das in Realität hierzu genutzte Durchstichwehr bleibt im Modell entsprechend geschlossen (Tabelle 6).

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel zur Entlastung der Havelniederung nach Durchgang eines Elbehochwassers

	<b>Realität</b>	<b>Modell</b>
Neuwerbener Wehr	geschlossen	geschlossen
Durchstichwehr	geöffnet	geschlossen, aber Pumpe im Modell ermöglicht die Entlastung der Havelniederung gemäß Kappungsmodell
Altarmwehr	geöffnet	geschlossen
Gnevsdorfer Wehr	geöffnet	geöffnet

Das Gnevsdorfer Wehr an der Mündung des Gnevsdorfer Vorfluters in die Elbe ist ein Sommerstauwehr. Gemäß Regelungsgrundsatz erfolgt eine Stauregelung lediglich im Sommer zwischen Mitte Mai und Mitte / Ende Oktober. In den Wintermonaten ist das Wehr geöffnet. Entsprechend erfolgt die automatische Regelung im Vorhersagemodell, wobei wie im Fall des Durchstichwehrs über eine Aktivierung / Deaktivierung der entsprechenden Schalter der Anwender in der Lage ist, zwischen der automatischen und manuellen Steuerung zu wechseln. Eine gezielte, durch Hochwasser ausgelöste Öffnung des Gnevsdorfer Wehrs ist vom Anwender auszuführen.

## 2.5 Neue Einteilung der Zwischeneinzugsgebiete im sächsischen Elbeabschnitt

Das LHWZ Sachsen erstellt seit langem operationelle Abflussvorhersagen für die Zwischeneinzugsgebiete im sächsischen Teil der Elbe, die auch bereits in früheren Vorhersagemodellen genutzt wurden. Seit Herbst 2015 erfolgt eine Vorhersage auch für den tschechischen Elbeabschnitt zwischen den Pegeln Ústí nad Labem und der Landesgrenze zu Deutschland. Entsprechend wurde im aktuellen Vorhersagemodell der Zuschnitt der Zwischengebiete verändert bzw. verfeinert: das bisherige ZG I (Zwischengebiet I), welches die Zuflüsse zwischen den Pegeln Ústí und Dresden summarisch erfasst hat, wurde in zwei Zwischengebiete (ZGCZ und ZG I) unterteilt, so dass nun folgende drei Zwischengebiete in das Hochwasservorhersagemodell eingehen:

- ZG CZ: Pegel Ústí nad Labem bis Landesgrenze bzw. Pegel Schöna
- ZG I: Pegel Schöna bis Pegel Dresden
- ZG II: Pegel Dresden bis Pegel Torgau

Nachfolgende Tabelle 7 listet die in den jeweiligen Zwischengebieten zusammengefassten Einzugsgebiete bzw. Gewässer auf (siehe auch Kap. 4.5.2.1 im Zwischenbericht (BfG 2017)).

Tabelle 7: Aktualisierte Einteilung der Zwischeneinzugsgebiete für die Hochwasservorhersage Elbe im tschechischen und sächsischen Elbeabschnitt des Vorhersagemodells

Gewässer	Referenzpegel	Einzugsgebietsgröße am Pegel
<b>Zwischengebiet zwischen Pegel Ústí n.L. und Pegel Schöna (ZG CZ)</b>		
Bilina	Trmice	963 km <sup>2</sup>
Ploucnice	Benesov nad Ploucnice	1156 km <sup>2</sup>
Kamenice	Hrensko	217 km <sup>2</sup>
<b>Zwischengebiet zwischen Pegel Schöna und Pegel Dresden (ZG I)</b>		
Kirnitzsch	Kirnitzschtal	157 km <sup>2</sup>
Lachsbach	Porschdorf 1	268 km <sup>2</sup>
Biela	Bielatal 1	37 km <sup>2</sup>
Cunnersdorfer Bach	Cunnersdorf 1	29 km <sup>2</sup>
Gottleuba	Neundorf	133 km <sup>2</sup>
Seidewitz	Liebstadt 2	25 km <sup>2</sup>
Wesenitz	Elbersdorf	227 km <sup>2</sup>
Müglitz	Dohna	198 km <sup>2</sup>
Lockwitzbach	Kreischa	44 km <sup>2</sup>
<b>Zwischengebiet zwischen Pegel Dresden und Pegel Torgau (ZG II)</b>		
Vereinigte Weißeritz	Plauen (ab 2017: Friedrichstadt)	368 km <sup>2</sup>
Wilde Sau	Wilsdruff 1	26 km <sup>2</sup>
Triebisch	Garsebach	165 km <sup>2</sup>
Ketzerbach	Piskowitz 2	157 km <sup>2</sup>
Jahna	Seerhausen 1	153 km <sup>2</sup>
Keppritzbach	Paltzschen 3	20 km <sup>2</sup>
Jahna-Umflut	Seerhausen 3	-
Döllnitz	Merzdorf	211 km <sup>2</sup>

Als Zugabepunkte der Abflussmengen im hydraulischen Modell wurden jeweils der unterstrom des Zwischeneinzugsgebietes gelegene Elbepegel gewählt. So wird ZG CZ unmittelbar oberstrom des Pegels Schöna, ZG I oberstrom des Pegels Dresden und ZG II nahe Pegel Torgau angesetzt. Die Zugabe erfolgt jeweils als lateraler Zufluss. Der Abruf der Messwerte und Vorhersagen für die drei genannten Zwischeneinzugsgebiete erfolgt operationell über das Hochwasserinformations- und -managementsystem (HWIMS) des Freistaates Sachsen.

## **2.6 Vereinfachte Berücksichtigung potenzieller Deichbrüche in der operationellen Vorhersage**

Im hydraulischen Modell der Elbe für die Hochwasservorhersage sind die Gewässer über Querprofile mit ihren Auen bis zu den Winterdeich- bzw. Hochwasserschutzanlagen erfasst. Modelltechnisch werden die Deiche als unendlich hoch angesetzt, d.h. bei extremen Wasserständen mit Überströmen von Hochwasserschutzanlagen oder beim Versagen derselben nimmt die Modellgüte deutlich ab, wenn derartige Entlastungseffekte nicht berücksichtigt werden. Eine vereinfachte Berücksichtigung zum Zweck der Hochwasservorhersage entlang der Elbe ist prinzipiell über punktuelle Wasserentnahme im Bereich von Versagensstellen möglich. Hierzu wäre allerdings ein Eingriff in das hydraulische Modell erforderlich, welcher jedoch im operationellen Betrieb zeitlich und ggf. auch fachtechnisch innerhalb eines Vorhersagesystems nicht leistbar ist. Eine pragmatische Möglichkeit, um im operationellen Fall bei Eintreten von Deichbrüchen dennoch seitens der Vorhersage reagieren und die Auswirkungen auf den weiteren Verlauf der Hochwasserwelle in der Elbe unterstrom der Versagensstelle grob abschätzen zu können, ist die Definition „potenzieller“ Deichbruchstellen im Modell. Da vorab nicht bekannt ist, wo etwaiges Versagen oder Überströmen stattfindet, muss diese Vorgehensweise stark vereinfacht bleiben, allerdings erscheint diese Option vorteilhafter zu sein, als keinerlei Möglichkeit einer Berücksichtigung. Dementsprechend wurden im neuen Vorhersagemodell in Abstimmung mit den Bundesländern entlang von Elbe, Elbe-Umflutkanal, Saale und Schwarzer Elster „potenzielle“ bzw. „fiktive“ Deichbruchstellen definiert. Diese können über die Bedienungsfläche durch den Anwender in der HVZ über eine zeitlich variable Breschenbreite aktiviert werden. Modelltechnisch erfolgt die Implementierung über zusätzliche kurze Modellstränge, auf denen ein vereinfachtes Zulaufprofil sowie eine Bresche definiert wurde, über die Wasser aus dem Hauptstrang in einen Speicher am Strangende laufen kann und entsprechend bei ablaufender Welle wieder zurück (Abbildung 16). Auch an anderen Flussgebieten, wie z. B. dem Rhein, wird vergleichbar innerhalb des Vorhersagemodells vorgegangen.

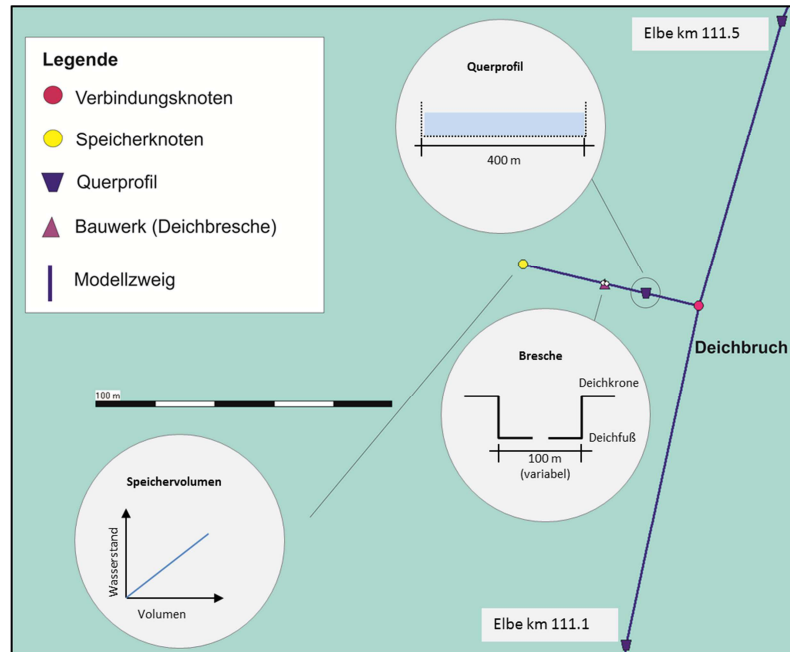


Abbildung 16: Schematische Darstellung potenzieller Deichbruchstellen im Vorhersagemodell

Folgende Aspekte sind in diesem Kontext zu beachten:

- Es handelt sich bewusst um stark vereinfachte Annahmen, damit im operationellen Fall eine wenn auch grobe, so doch plausible Abschätzung über die Auswirkung von Deichbrüchen auf die Hochwasserwelle ermöglicht wird. Die Modellabbildung ist weder geeignet, als Nachweisinstrumentarium eingesetzt zu werden, noch können hiermit Aussagen zur tatsächlichen zeitlichen und räumlichen Verteilung des Wassers hinter den Deichen bzw. Hochwasserschutzanlagen getroffen werden.
- Im operationellen Fall werden Volumina und Lage der Versagensstellen von den vordefinierten Parametern abweichen. Dennoch ermöglichen die nach bestem Wissen parametrisierten potentiellen Deichbruchstellen eine sinnvolle Abschätzung der hydraulischen Effekte.
- In der aktuellen Parametrisierung wird stets von einem Versagen / Bruch des Bauwerks bis auf den Deichfuß ausgegangen. Die Höhe der Einlaufschwelle in das Deichhinterland entspricht somit der Deichfußhöhe.
- Die Standard-Breschenbreite wird auf 100 m gesetzt. Dieser Wert kann jedoch vom Anwender im Fall anderslautender Informationen über die WAVOS-Oberfläche angepasst werden, auch in ihrem zeitlichen Verlauf. Dies erfordert allerdings einen guten Informationsfluss in die Vorhersagezentrale hinein.
- Die Volumina werden unter Annahme eines horizontalen Wasserspiegels für den Bemessungslastfall des Deiches ermittelt.
- Die Entleerung der Überflutungen erfolgt durch die Bresche. Ein paralleles Strömen von Wasser hinter den Schutzanlagen wird vernachlässigt.

## 2.7 Modelllayout

Ausgehend vom SOBEK-Basismodell stellt sich das aktualisierte Vorhersagemodell mit seinen 31 Vorhersagepegeln entlang der zahlreichen Modellstränge wie in Abbildung 17 gezeigt dar.

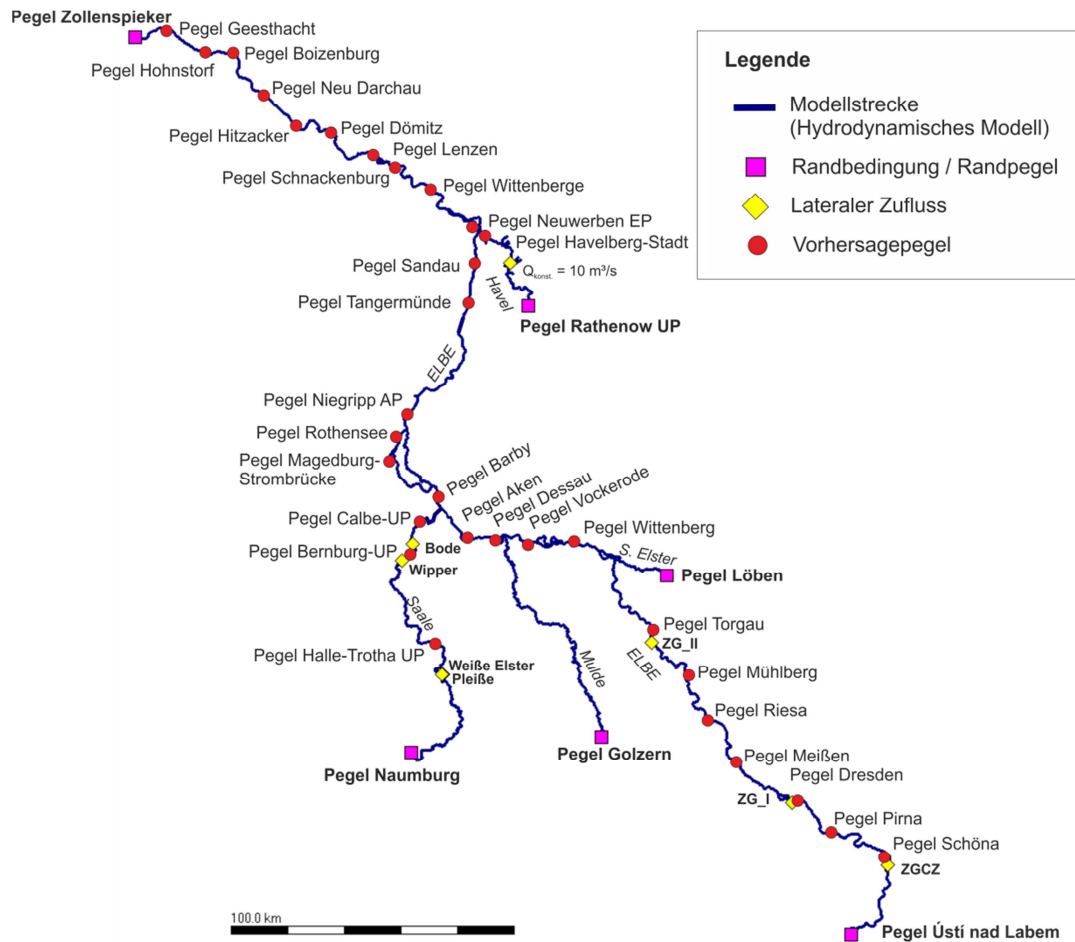


Abbildung 17: Modellstruktur des SOBEK-Modells der Elbe zur Hochwasservorhersage

Das aktualisierte und erweiterte SOBEK-Modell umfasst gut 1000 Gewässerkilometer (davon ca. 650 km Elbe). Aktuell sind 12 Zuflüsse (magentafarbene und gelbe Symbole in Abbildung 17) im Modell berücksichtigt. Als untere Randbedingung am Pegel Zollenspieker werden Wasserstände angesetzt. Die in Tabelle 8 dargestellten Faktoren bzw. Fließzeiten der Zuflüsse (Parameter: Abfluss) dienen der vereinfachten Berücksichtigung des zwischen Pegel und Mündung gelegenen Resteinzugsgebiets sowie übriger, nicht durch Messungen erfasster Zwischeneinzugsgebiete bzw. der zusätzlichen Wellenlaufzeit zwischen dem Referenzpegel und der Mündung in den Vorfluter. Zusätzlich zu den in Tabelle 8 aufgeführten zeitlich variablen Zuflüssen, ist im Bereich des Havelwehrs Garz ein konstanter lateraler Zufluss definiert, der basierend auf der Abflussbilanz an den Havelpegeln Rathenow und Havelberg parametrisiert wurde (ARGE SOBEK-Elbe 2009).

Im Modell wurden in 7 Bereichen (Stromteilung Pillnitz, Dresdener Flutrinnen Mündungsbe-  
reich Schwarze Elster, Mäanderstrecke Coswig, Stromteilung Magdeburg, Havelmündung,  
Deichrückverlegungen Lenzen) insgesamt 16 Verzweigung angelegt, um unterschiedliche  
Fließwege mit den Möglichkeiten eines eindimensionalen Modells bestmöglich  
nachuempfinden. Im Modellzustand 2018 (siehe Kapitel 6) kommen noch zwei weitere  
Verzweigungen an der Mulde im Bereich der Polder Löbnitz und Rösa hinzu.

Tabelle 8: Zuflüsse und Referenzpegel des aktuellen Hochwasservorhersagemodells der Elbe

Zufluss	Referenzpegel	Faktor [-]	Fließverzögerung [h]
Elbe / Labe	Ústí nad Labem	1,00	0
ZGCZ	Zwischengebiet Ústí - Schöna	1,00	0
ZG_I	Zwischengebiet Schöna - Dresden	1,00	0
ZG_II	Zwischengebiet Dresden - Torgau	1,00	0
Schwarze Elster	Löben	1,00	0
Mulde	Golzern	1,00	0
Saale	Naumburg	1,00	0
Pleiße	Böhlen	1,00	7
Weißer Elster	Zeitz	1,00	11
Wipper	Grossschießstedt	1,00	2
Bode	Hadmersleben	1,00	7
Havel	Rathenow UP	1,00	0

Das Vorhersagemodell weist zudem 26 feste sowie 43 gesteuerte Bauwerke bzw. Bauwerksgruppen auf. Neben den Bauwerken, die auch in der Realität existieren, waren in einigen Bereichen auch Bauwerke als ausschließlich modellinterne Konstrukte erforderlich. Dies betrifft die Berücksichtigung von Kurzschlussströmungen über das Vorland (z. B. im Bereich der Mäanderstrecke Coswig), Rückstaubereiche in einmündende Nebengewässer (siehe Kapitel 2.3.2), die Implementierung von Kappungsganglinien im Bereich der Havel (siehe Kapitel 2.4) sowie potentielle Deichbruchstellen (siehe Kapitel 2.6).

Die räumliche Auflösung der Querprofile, die in 1D HN-Modellen die Modelltopografie an diskreten Orten abbilden, liegt im Mittel bei 200 m. Dazwischen interpoliert das Modell. Ebenfalls an diskreten Punkten findet die Berechnung, also die Lösung der Strömungsgleichungen (siehe Kapitel 3) statt. Diese Punkte, Rechenpunkte genannt, liegen beim SOBEK-Basismodell auf den Querprofilen. Für die operationelle Vorhersage wurden die Rechenpunkte zu Gunsten einer erhöhten Performanz des Modells auf im Mittel 800 m an der Elbe bis zur Havelmündung (unterstrom der Havel Beibehaltung der originären Auflösung von 200 m) und an der Schwarzen Elster ausgedünnt. An der Saale wurde eine Diskretisierung von im Mittel 400 m gewählt. An der Mulde (200 m bis 800 m) und Havel (200 m) wurde die originäre Definition des Rechenrasters unmittelbar auf den Querprofilen beibehalten. Die Ausdünnung der Berechnungspunkte war erforderlich, um praktikable Rechenzeiten im Bereich weniger Minuten pro simuliertem Tag zu erhalten (siehe auch Kapitel 4.5), die in ähnlicher Größenordnung wie im Fall des WAVOS-1D – Modells liegen. Durch die beschriebene Ausdünnung des Berechnungsrasters konnte einer Verringerung der Rechenzeit um etwa den Faktor 3 erzielt werden (20 s pro simuliertem Tag anstatt 1 min!). Da

in SOBEK das Rechenraster grundsätzlich unabhängig von der zu Grunde liegenden Querprofildiskretisierung ist, geht durch die Ausdünnung des Rechenrasters keine Information verloren, sondern es besteht jederzeit die Möglichkeit, abschnittsweise oder für das Gesamtmodell auf die originäre Auflösung, bei der jedem Querprofil auch ein Berechnungsknoten zugeordnet ist, zurückzukehren. Im Bereich von Bauwerken definiert SOBEK automatisch einen Berechnungsknoten 0,5 m ober- und unterhalb, um den mitunter diskontinuierlichen Übergang adäquat abbilden zu können. Die zeitliche Diskretisierung wurde auf Grund von Erfahrungswerten an anderen Gewässern zu 1 min gewählt. Eine Vergrößerung der Berechnungsschrittweite führt zu keiner merklichen Senkung der Berechnungszeiten, mitunter wird sogar ein gegenteiliger Effekt erzielt, da innerhalb eines Zeitschritts die Anzahl der Iterationen überproportional anwächst.



### 3 Das Modellsystem SOBEK und das GIS-Werkzeug ArcSOBEK

Das im Zuge der Aktualisierung des Vorhersagemodells für die Binnenelbe eingesetzte Modellsystem SOBEK ist ein modular aufgebautes Softwaresystem, das weltweit zur Durchführung hydraulischer Berechnungen unterschiedlichster wasserwirtschaftlicher Fragestellungen (u.a. operationelle Wasserstandsvorhersagen) eingesetzt wird. Entwickelt wird SOBEK vom niederländischen Institut Deltares; dort ist SOBEK auch das Standardwerkzeug zur eindimensionalen hydraulischen Berechnung. Von den verfügbaren Modulen (z. B. Morphodynamik, Gewässergüte etc.) kommt zur Erstellung des Vorhersagemodells ausschließlich das hydrodynamische Fließgewässermodul SOBEK-River zum Einsatz. SOBEK-River basiert, genau wie WAVOS-1D, auf der numerischen Lösung der eindimensionalen Saint-Venant-Gleichung und ermöglicht die Berechnung stationärer wie instationärer Strömungsvorgänge. Im Kontext der Vorhersage wird SOBEK ausschließlich instationär betrieben.

Die numerische Lösung der Strömungsgleichung erfolgt in SOBEK mit einer Finiten Differenzen Methode. Das Modellgebiet wird hierzu in diskrete Berechnungspunkte entlang der Flussläufe zerlegt. Zwischen diesen Punkten wird die zu lösende Differenzialgleichung mittels einer Taylorreihenanalyse erster Ordnung als Differenzengleichung diskretisiert. Sämtliche Differenzengleichungen werden in einem algebraischen Gleichungssystem zusammengefasst und iterativ gelöst. Zur Stabilisierung der Berechnung wird das sog. „Delft-Schema“, ein Staggerd grid – Ansatz, verwendet. Die Berechnung der Primärvariablen (Wasserstand) wird von der Berechnung der Sekundärvariablen (Durchfluss) räumlich entkoppelt. Die Berechnung des Wasserstandes erfolgt an den Modell-Knoten, die Berechnung der Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten geschieht an den zwischen den Berechnungsknoten liegenden Strängen. Die Vorgabe der Systemparameter (Querschnitte, Rauheiten, Randbedingungen) erfolgt jeweils an den Berechnungsknoten in Form von Querprofilen oder Zeitreihen. Die zur Lösung der Strömungsgleichungen benötigten geometrischen Größen (Fließquerschnitt, hydraulischer Radius, benetzter Umfang, Breite Wasserspiegel) werden programmintern aus diesen Profilen abgeleitet. Weitergehende Informationen zum Modellsystem SOBEK sowie den theoretisch-numerischen Hintergründen sind dem Reference Manual zu entnehmen (Deltares 2016).

Mit dem GIS-Werkzeug ArcSOBEK können aus Geländedaten die für SOBEK erforderlichen Profildaten im Format „SOBEK-River Profile“ abgeleitet werden. ArcSOBEK ist als Freie Software lizenziert und als ArcToolbox unmittelbar innerhalb von ArcGIS nutzbar (ARGE SOBEK-Elbe 2009). Die SOBEK-River-Profile bilden die reale Profilgeometrie über ein symmetrisches Höhen-Breiten-Verhältnis volumentreu ab. Hierbei wird einerseits zwischen durchströmten Bereichen und Retentionsbereichen unterschieden (siehe Abbildung 20, rechts). Letztere haben zwar keinen Anteil am Wassertransport, tragen jedoch zur Speicherkapazität im Querprofil bei. Zum anderen werden zur späteren Differenzierung der Rauheiten (siehe Kapitel 4.2) innerhalb des Profils die drei Bereiche Hauptgerinne, Uferbereich und Vorland unterschieden, wobei Hauptgerinne und Uferbereich stets zum durchströmten Profil-

bereich zu rechnen sind. Eine für die hydrodynamische Modellierung wichtige Besonderheit im SOBEK-River-Profilformat ist die sogenannte Sommerdeich-Funktion. Mit dieser Funktion können Bereiche explizit berücksichtigt werden, die durch Sommerdeiche oder sommerdeich-ähnliche Strukturen (z.B. Straßen- oder Bahntrassen in Dammlage) vom Hauptströmungsgebiet abgetrennt sind und erst dann am Abflussgeschehen teilhaben, wenn der Wasserstand die Sommerdeichkrone übersteigt. Das Volumen hinter dem Sommerdeich steht dann zusätzlich im Profil zur Verfügung, wobei auch hier zwischen Fließbereich und Retentionsbereich unterschieden werden kann (Deltares 2016). Dabei berücksichtigt SOBEK eine sogenannte "transition height" (Übergangshöhe). Das Zuschalten des Bereichs hinter Sommerdeichen erfolgt im Modell nicht schlagartig, sondern der berücksichtigte Anteil dieses Bereichs wächst linear an, bis der Wasserspiegel die Sommerdeichhöhe einschließlich der Übergangshöhe (für das Elbemodell liegt diese bei dem typischen Wert von 1 m) erreicht hat.

Zur Erstellung der Querprofile für das hydrodynamische Modell werden neben den reinen Geometrieinformationen (DGM) dementsprechend Daten zur Abgrenzung der durchströmten Bereiche von den Retentionsbereichen sowie Daten zur Definition der Rauheitszonierung benötigt. Des Weiteren sind Daten zur Erfassung von Gebieten hinter Sommerdeichen erforderlich sowie ggf. die Flächen stehender Gewässer im Vorland, die bei Hochwasser ähnlich wie die Bereiche hinter Sommerdeichen, eine Wirkung als Retentionsraum entfalten können. Die Festlegung sämtlicher Gebiete erfolgt als Polygonthema im GIS. Für das aktualisierte SOBEK-Vorhersagemodell der Elbe wurde dabei in erster Linie auf Geländemodell-, Luftbilder und Hochwassergefahrenkarten (HWGK) mit klassifizierten Intensitäten für Hochwasserereignisse unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit zurückgegriffen. So sind zum Beispiel Gebiete mit dichtem Bewuchs oder Bebauung, die jeweils als nicht durchströmt gelten, gut abgrenzbar, wie exemplarisch für einen Abschnitt der Mulde (Bereich Priorau) in Abbildung 18 gezeigt.

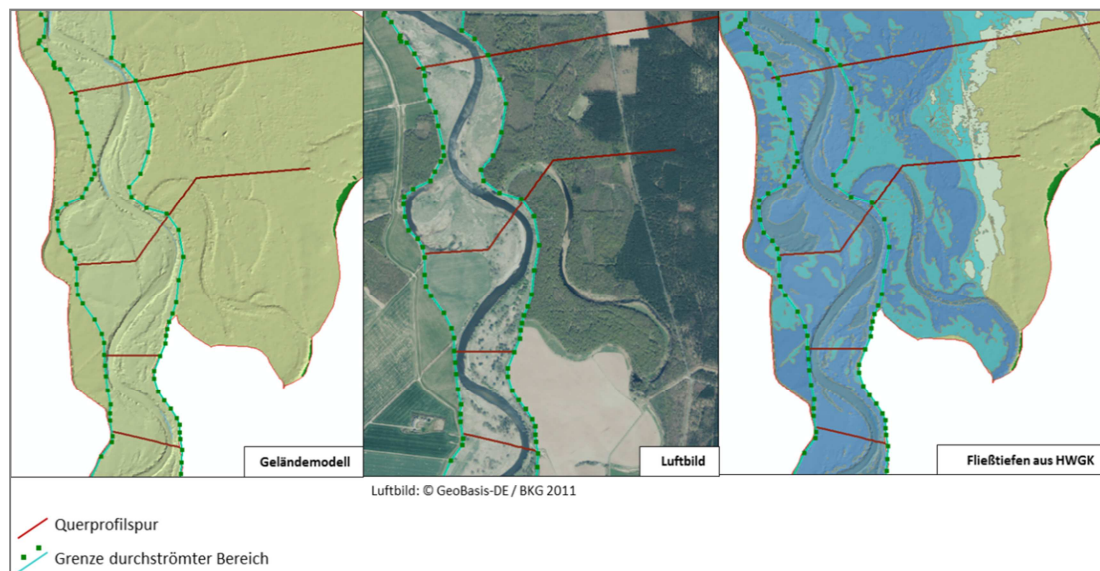


Abbildung 18: Datenquellen (Geländemodell, Luftbild, Hochwassergefahrenkarte) zur Festlegung modellrelevanter Geofachdaten (hier: durchströmter Bereich)

Die Kombination aus Geländeinformation und Geofachdaten (Profilbereiche, durchströmte / nicht durchströmte Bereiche, Sommerdeichflächen) erfolgt durch die Verschneidung der Querprofilspuren mit den entsprechenden Geodaten im GIS. Anschließend werden mittels ArcSOBEK daraus die Höhen-Breiten-Tabellen für die SOBEK-River-Profile abgeleitet. Dazu wird jeweils ausgehend vom tiefsten Punkt eines Querprofils in Höhenintervallen von 20 cm ausgewertet, wie breit der Flussquerschnitt ist. Dabei wird unterschieden zwischen Fließquerschnitt und Gesamtquerschnitt (= Fließquerschnitt + Retentionsquerschnitt). Für diese Breitenauswertung wird linear zwischen den Koordinaten ( $y, z_{DGM}$ ) der einzelnen Querprofilpunkte interpoliert (siehe Abbildung 19). Nicht angeschlossene Seen, Sommerdeichflächen und Flutrinnen im Vorland werden in der Auswertung erst ab der Sommerdeichhöhe berücksichtigt. Diese Flächen bzw. Volumina, welche in der Breitenauswertung zunächst „gedeckelt“ werden, werden separat ermittelt (ggf. getrennt für strömende und ausschließlich speichernde Bereiche) und explizit (mit der maßgebenden Deichhöhe) im SOBEK-Querprofil definiert.

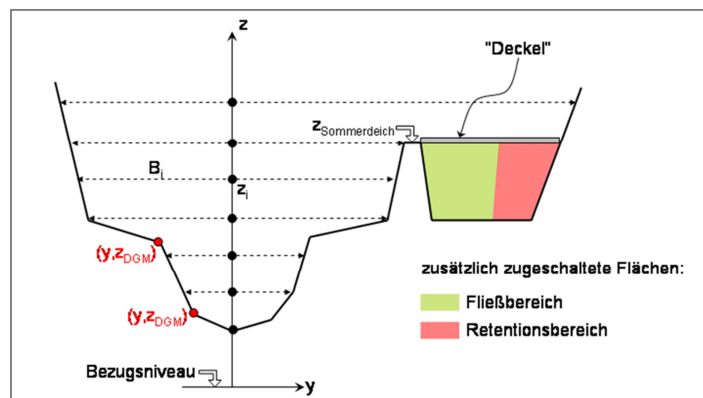


Abbildung 19: Prinzipskizze der Höhen-Breiten-Auswertung innerhalb von ArcSOBEK für eine Querprofil mit Sommerdeich (Quelle: BCE 2017)

Neben der Generierung der tabulierten SOBEK-Profile können mittels ArcSOBEK und der Gewässerachse durch Verschnitt mit den Querprofilspuren Shape-Dateien generiert werden, über die der Import in SOBEK und der Aufbau der Modelltopologie dort erfolgen kann. Der letzte Schritt der Querprofilerstellung ist stets die stichprobenartige visuelle Kontrolle. Das Verfahren ArcSOBEK wurde im Kontext der Erstellung des SOBEK-Basismodells (siehe Kapitel 2.1) entwickelt und dort erfolgreich eingesetzt. Anschließend wurde ArcSOBEK auch zur Profilgenerierung im Rahmen der Erstellung der SOBEK-Modelle der Donau sowie des staugeregelten Oberrheins angewendet.

## 4 Kalibrierung und Validierung

Kalibrierung und Validierung sind essentielle Schritte beim Aufbau eindimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle (siehe auch BfG 2017, Kapitel 4.6). Im Zuge der Kalibrierung werden die empirischen Modellparameter (im Fall eines 1D-Modells in erster Linie der Strömungswiderstand / die Rauheit, siehe Kapitel 4.2) angepasst, um die Naturbeobachtungen (vorrangig Wasserstände und Abflüsse) möglichst optimal nachbilden zu können. Im Idealfall stehen aufgrund der Fließtiefenabhängigkeit des Strömungswiderstands zur Kalibrierung mehrere Ereignisse aus dem Abflussspektrum, in dem das Modell später primär eingesetzt werden soll, zur Verfügung. Die Validierung des Modells wird im Anschluss an die Kalibrierung vorgenommen und dient dem Nachweis der Übertragbarkeit der Modellanwendung auf andere Abflussereignisse als die zur Kalibrierung verwendeten. Entsprechend müssen sich die hydrologischen Ereignisse der Validierung von denen zur Kalibrierung unterscheiden. Zu beachten ist bei der Auswahl der Kalibrierungs- und Validierungseignisse grundsätzlich, dass die Geländesituation bei den Ereignissen vergleichbar bzw. identisch ist.

### 4.1 Kalibrierungs- bzw. Validierungseignisse

Der Fokus bei der Kalibrierung des SOBEK-Modells lag auf der instationären Betrachtung, da dies dem späteren Einsatzzweck in der Vorhersage entspricht. Hinzukommt, dass das Basismodell, welches der Ausgangspunkt der Kalibrierung darstellt, bereits umfangreich stationär zwischen Niedrig- und Hochwasserbereich kalibriert worden ist (ARGE SOBEK-Elbe 2009). Zur instationären Kalibrierung und Validierung (siehe Tabelle 9) wurden die drei Hochwasserereignisse 2013, 2011 und 2006 ausgewählt (BfG 2017, Kapitel 4.6). Das Hochwasser 2006 wurde dabei als das zeitlich am weitesten zurückliegende Ereignis zur Modellvalidierung verwendet, wobei bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten ist, dass nach diesem Ereignis drei große Deichrückverlegungsmaßnahmen (Lenzen, Mahnkenwerder, Neu Bleckede) realisiert wurden. Der Fokus liegt entsprechend auf dem Bereich oberstrom des Pegels Schnackenburg (Elbe-km 474,6), wo keine elementaren topografischen Veränderungen stattgefunden haben. Zusätzlich wurde anhand des Hochwassers 2013, für das eine aktuelle Fixierung vorlag, stationär validiert. Die stationäre Berechnung ist insofern von der instationären Simulation des 2013er Hochwassers unabhängig, als dass die Abflusskonstellation sich in beiden Fällen unterscheidet. Während sich im instationären Fall die Durchflüsse im Gerinne auf Grund der zeitlichen Überlagerung der Elbewelle mit ihren Zuflüssen (sowie weiterer Einflussgrößen, wie z. B. Deichbrüche) dynamisch ergibt, wird bei der stationären Berechnung der Durchfluss am jeweiligen Pegel explizit vorgegeben bzw. eingestellt. Die Zuflüsse zum Modell basieren somit nicht, wie im instationären Fall, unmittelbar auf realen Messdaten (die über Abflusstafeln in Abflüsse umgerechnet und ggf. mit einem Faktor vergrößert wurden), sondern werden in Bezug zu den zu erreichenden Elbeabflüssen definiert.

Im Rahmen der instationären Kalibrierung war das Hochwasser 2013 auf Grund seiner Extreme in weiten Bereichen des Modellgebiets von großer Relevanz. Dennoch ist auch das Hochwasserereignis 2011 insofern für die Kalibrierung interessant, als dass es auch ein gro-

ßes Hochwasser war, in dessen Verlauf es jedoch zu keinen Deichüberströmungen bzw. Deichbrüchen gekommen ist. Diese stellen trotz bestmöglicher Abschätzung grundsätzlich ein Erschwernis in der Kalibrierung bzw. eine zusätzliche Unsicherheitsquelle dar.

Tabelle 9: Zur Kalibrierung und Validierung verwendete Hochwasserereignisse

Ereignis	Auswertungszeitraum	Simulationszeitraum
<b>Kalibrierung</b>		
Hochwasser 2013	15.05.2013 – 23.06.2013	05.05.2013 – 23.06.2013
Hochwasser 2011	10.12.2010 – 08.02.2011	01.12.2010 – 08.02.2011
<b>Validierung</b>		
Hochwasser 2006	10.03.2006 – 28.04.2006	28.02.2006 – 28.04.2006
Hochwasser 2013 (stationär)	Wasserspiegelfixierung zwischen dem 07. und 14.06.2013	

Kalibriert wurde in erster Linie auf den Wasserstand, wobei im Fall der instationären Ereignisse vorab eine grobe Überprüfung der Plausibilität der Abflussbilanzen durchgeführt wurde. Zudem wurde neben dem Wasserstandsverlauf auch das Wasserstand-Abfluss-Verhältnis zwischen Modell und Pegel (sofern es sich um einen Abflusspegel handelt) berücksichtigt, um Unstimmigkeiten im Abfluss nicht übermäßig stark durch eine Anpassung der Rauheiten zu kompensieren (siehe Kapitel 4.2).

Neben Unterschieden in der Genese und Höhe der gewählten Hochwasser sind auch die anthropogenen Einflüsse verschieden (siehe auch BfG 2017, Kapitel 5.1 und 5.2). Während das Pretziener Wehr bei allen drei Hochwassern geöffnet wurde, kamen die Havelpolder nur beim Hochwasser 2013 zum Einsatz. Für dieses Ereignis gilt es auch die großen Deichbrüche in Fischbeck (Elbe) und Klein Rosenburg / Breitenhagen (Saale) bestmöglich zu berücksichtigen.

## 4.2 Vorgehensweise und Rauheitsansatz

Ziel der hydraulischen Kalibrierung ist es, eine möglichst gute Wiedergabe der gemessenen Wasserstände an den Vorhersagepegeln, sowie im Fall des stationären Ereignisses an den Fixierungspunkten entlang der Elbe, zu erreichen. In der Kalibrierung werden in erster Linie die hydraulischen Rauheiten innerhalb plausibler Grenzen variiert, mitunter ist auch die Einteilung zwischen abflusswirksamem und nicht-durchströmtem Bereich innerhalb der Querprofile anzupassen. Letzteres beeinflusst insbesondere den zeitlichen Wellenverlauf.

Als Rauheitsparameter wird in diesem Modell eine äquivalente Sandrauheit (White-Colebrook) verwendet. Bezüglich der Rauheitszonierung können innerhalb der Querprofile grundsätzlich drei Bereiche definiert werden (Abbildung 20, links): Hauptgerinne („Main“), Uferbereich („FP1“) und Vorland („FP2“). Neben der Definition im Profil erfolgt die Zuweisung der Rauheiten i.d.R. auch über einen gewissen Gewässerabschnitt, also in der Länge. Um diesen noch weiter unterteilen zu können besteht die Möglichkeit der Definition in Abhängigkeit von der Länge im Gewässerstrang ( $f(x)$ ). Des Weiteren ist es möglich nach Fließtiefe und Abfluss zu differenzieren, also  $f(h, x)$  und  $f(Q, x)$ . Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit zur Definition von Werten für einzelne Profile oder auch die Festlegung globaler Parameter.

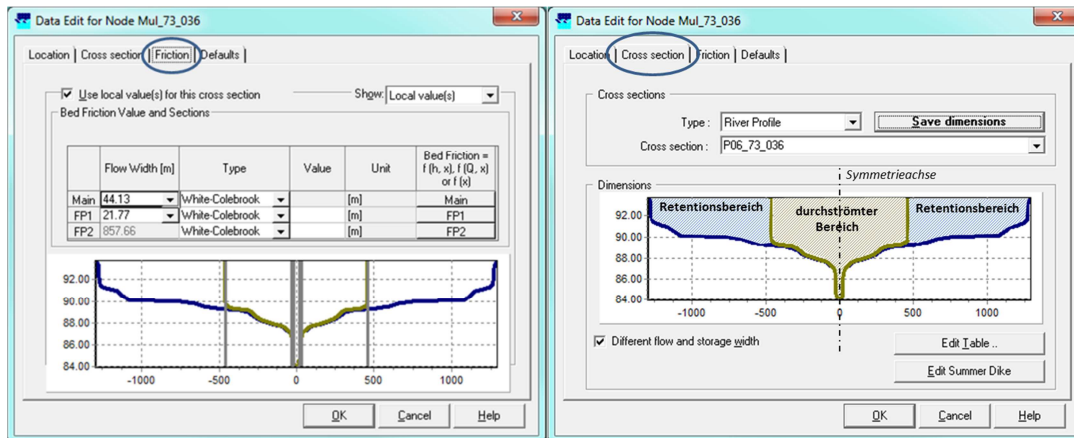


Abbildung 20: Beispiel Rauheitsdefinition im Querprofil für die drei Profilbereiche

Im Vorhersagemodell Elbe erfolgte die Definition der Rauheiten abschnittsbezogen, meist mit zusätzlicher Unterteilung für verschiedene Abfluss- bzw. Wasserstandsbereiche. Den Ausgangspunkt der Modellkalibrierung bildet die Rauheitsbelegung des Basismodells. In den erweiterten Modellabschnitten erfolgt zunächst eine Übertragung der Rauheiten aus nächstgelegenen Strecken.

### 4.3 Ergebnisse

Die Güte der Modellkalibrierung und -validierung wird zunächst anhand der jeweils kontinuierlichen Simulation für die jeweiligen Zeiträume (siehe Tabelle 9) bewertet. Dabei werden die Wasserstandsganglinien einerseits visuell geprüft und bewertet. Neben dieser eher qualitativ-subjektiven Bewertung, die nichtsdestotrotz sehr wichtig ist, erfolgt andererseits eine (objektive) Bewertung anhand verschiedener statistischer Gütemaße. Dabei wird auf die folgenden im Bereich der hydrodynamischen Modellierung etablierten und auch bereits im Rahmen des Zwischenberichts verwendeten Gütemaße zurückgegriffen. Da der Wasserstand die primäre Zielgröße in der Hochwasservorhersage für die Elbe darstellt, beziehen sich die Gütemaße entsprechend auf die Wasserstandsganglinien:

- ME (Mittlerer Fehler)  
Der mittlere Fehler (Optimum = Null) ist eines der gebräuchlichsten Streuungsmaße. Die Abweichungen zwischen Modell und Messung werden unter Berücksichtigung ihres Vorzeichens gemittelt, so dass sich positive und negative Differenzen ausgleichen können. Der mittlere Fehler erlaubt Rückschlüsse auf eine systematische Über-/Unterschätzung.
- MAE (Mittlerer absoluter Fehler)  
Der mittlere absolute Fehler beschreibt die Höhe der Abweichung der Simulation von der Messung, erlaubt jedoch keine Aussage über die Abweichungsrichtung (Über- oder Unterschätzung). Positive und negative Abweichungen gleichen einander nicht aus. Das Optimum liegt bei null.
- RMSE (Root Mean Square Error, Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler)

Der RMSE gibt an, wie stark im Durchschnitt das Modellergebnis von der Messung abweicht. Infolge des Quadrierens werden größere Abweichungen implizit stärker gewichtet als kleinere. Der optimale RMSE liegt bei null. Je größer der RMSE ist, desto schlechter ist die Güte des Modells.

– NSE (Nash-Sutcliffe efficiency, Nash-Sutcliffe Effizienz)

Der NSE ist insbesondere für die Beurteilung im Hochwasserbereich geeignet, da die Abweichung zwischen Modell und Messung quadratisch eingeht, wodurch hohe Wasserstände stärker gewichtet werden als niedrige Werte. Das Optimum liegt bei 1. NSE-Werte kleiner Null bedeuten, dass das Modell die Messung schlechter abbildet als der Mittelwert der Messwerte. Der NSE erlaubt als einheitenloses Gütemaß den Vergleich zwischen verschiedenen Pegeln.

– Scheiteldifferenz

Als Scheiteldifferenz wird der Unterschied zwischen dem simulierten und dem gemessenen Wasserstandsscheitel (in cm) verstanden. Die zeitliche Komponente spielt bei diesem Gütemaß keine Rolle. Positive Werte zeigen eine Überschätzung des realen Scheitels an, negative Werte eine entsprechende Unterschätzung.

– Scheiteleintrittszeitpunkt

Der Scheiteleintrittszeitpunkt bewertet die zeitliche Übereinstimmung der simulierten mit der gemessenen Hochwasserwelle. Da sich bei Bestimmung der Scheiteleintrittszeiten für Hochwasserwellen mit einem langen, flachen Scheitelplateau bereits kleine Wasserspiegelschwankungen stark auswirken, wurde ein Toleranzbereich von 2 cm definiert. Dies bedeutet, dass für Simulation und Messung ausgehend vom maximalen Wasserstand ein Bereich definiert wird, in dem die Wasserstände bis zu 2 cm unterhalb des Maximums liegen. Der zeitliche Mittelwert dieser Bereiche wird als Scheiteleintrittszeitpunkt definiert und zwischen Simulation und Messung verglichen. Negative Werte zeigen einen verfrühten Scheiteleintritt im Modell an.

Als Zeiträume für die Auswertung wurden die in Tabelle 9 aufgeführten Zeiträume verwendet. Dabei wurden die Zeiträume bewusst größer als noch im Zwischenbericht (BfG 2017, Kapitel 5.2.2) gewählt, um auch den anlaufenden sowie ablaufenden Bereich der Hochwasserwellen explizit mit zu bewerten. Die Güte der Kalibrierung wird in den folgenden Kapiteln in erster Linie für folgende ausgewählte Pegel ausführlich ausgewertet: Pegel Dresden, Pegel Wittenberg, Pegel Barby, Magdeburg-Strombrücke, Pegel Wittenberge, Pegel Dömitz, Pegel Neu Darchau und Pegel Halle-Trotha (Saale). Im Fall von Besonderheiten an anderen Pegeln wird auch darauf eingegangen. Ansonsten sind im Anhang A die Ergebnisse für alle 31 Vorhersagepegel grafisch dargestellt.

### 4.3.1 Hochwasserereignis 2013

Tabelle 10 fasst die statistischen Gütemaße für ausgewählte Vorhersagepegel für das Hochwasser 2013 zusammen (vollständige Tabelle siehe Anlage A-1). Insgesamt ist das Ergebnis der Kalibrierung für dieses extreme Hochwasser bis in den Bereich der Havelmündung als gut bis sehr gut zu bezeichnen (siehe auch Anlage A-1). Einzige Ausnahme ist der Pegel Mühlberg, dessen Simulation im Scheitel auch bei deutlicher Erhöhung der Rauheit zu niedrig ausfällt. Die benachbarten Pegel (Riesa, Torgau) zeigen gute Ergebnisse, auch besonders im Scheitelbereich. In Bezug auf die Wellenlaufzeiten liefert das SOBEK-Modell ein sehr

gutes Abbild der realen Verhältnisse. Der Deichbruch bei Fischbeck sowie der Einsatz der Havel zur Scheitelkappung beeinflussen den Wasserstandsverlauf unterstrom von Tangermünde nachhaltig und führen im SOBEK-Modell zu einer durchgehenden Überschätzung der Scheitelwasserstände zwischen Pegel Tangermünde und Geesthacht. Die Ergebnisse der stationären Validierung (Kapitel 4.3.4) bestätigen diese Systematik hingegen nicht und die Differenzen an den Pegeln zwischen Tangermünde und Hohnstorf liegen im Bereich von überwiegend unter 10 cm.

Tabelle 10: Güteparameter für ausgewählte Pegel für das Hochwasser 2013

Pegel	ME [cm]	MAE [cm]	RMSE [cm]	NSE [ - ]	$\Delta W$ Scheitel [cm]	$\Delta t$ Schei- tel [h]
Dresden	0.6	12.0	13.9	0.996	- 9	1
Wittenberg	8.3	13.8	15.6	0.986	6	7
Barby	-8.6	12.6	16.8	0.990	6	0
Magdeburg	2.8	8.4	10.2	0.996	21	-1
Wittenberge	4.2	9.9	12.0	0.994	30	0
Dömitz	13.9	17.5	22.1	0.982	46	-11
Neu Darchau	12.9	18.1	23.9	0.980	65	-24
Halle-Trotha	15.5	19.8	23.3	0.981	-1	8

Wie sich die Ergebnisse des SOBEK-Modells zu den WAVOS-1D - Ergebnissen verhalten zeigen die nachfolgenden Abbildungen. Darin sind die SOBEK-Ergebnisse stets in rot, die WAVOS-1D-Ergebnisse in grau und die Messwerte in schwarz aufgetragen.

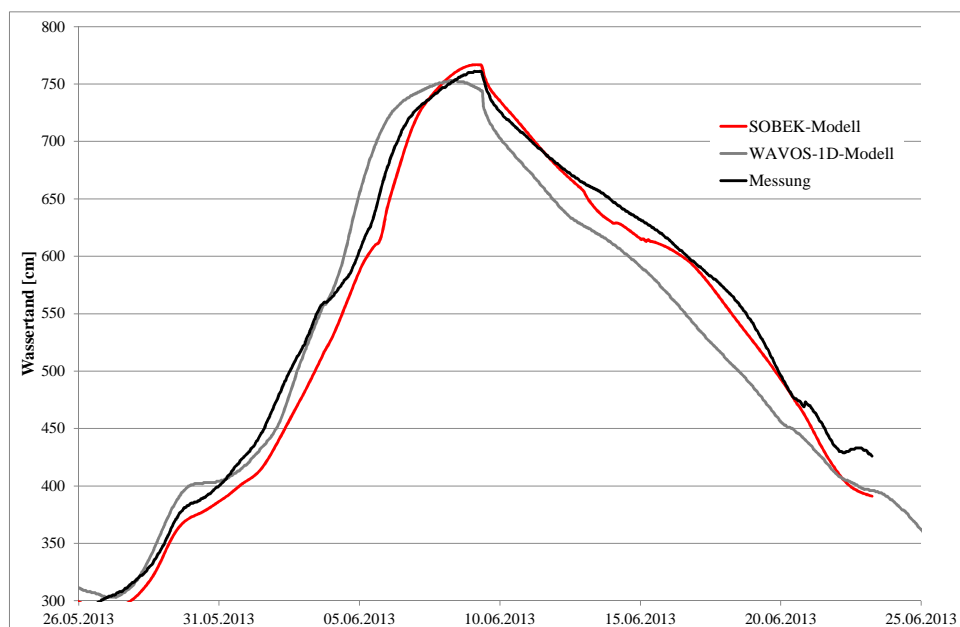


Abbildung 21: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Barby beim Hochwasser 2013



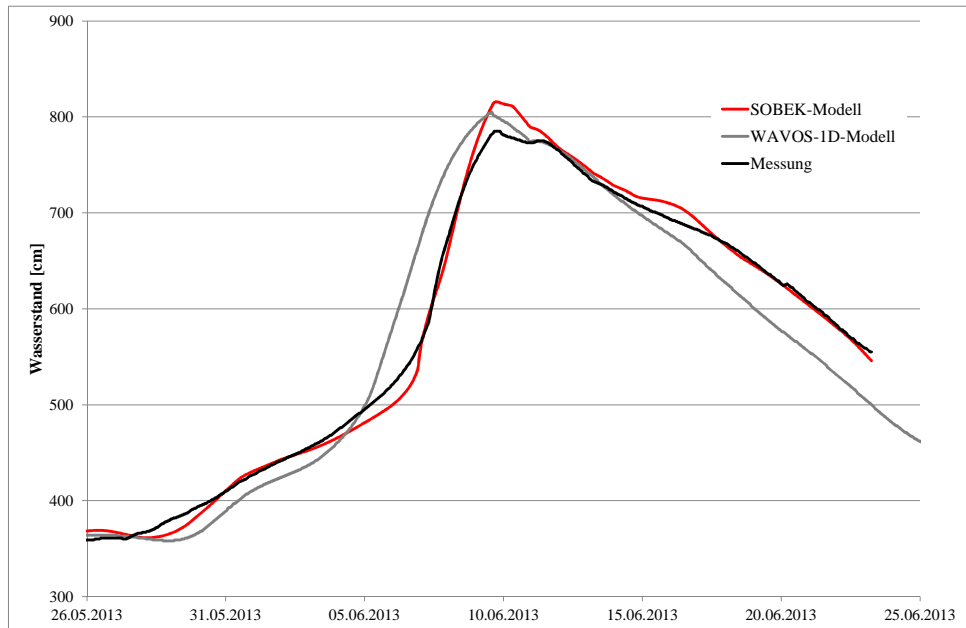


Abbildung 22: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Wittenberge beim Hochwasser 2013

Abbildung 21 stellt die Ergebnisse beim 2013er Hochwasser am Pegel Barby dar. Läuft die simulierte Ganglinie des SOBEK-Modells im ansteigenden Bereich der Welle noch erkennbar nach, so sind die Ergebnisse im Scheitelbereich und im abfallenden Wellenast als sehr gut zu bezeichnen. Auch in Abbildung 22 wird für den Pegel Wittenberge die gute zeitliche Nachbildung der Hochwasserwelle im SOBEK-Modell erkennbar, wenngleich der durch die Scheitelkappung und Deichbrüche beeinflusste Scheitel leicht überschätzt wird.

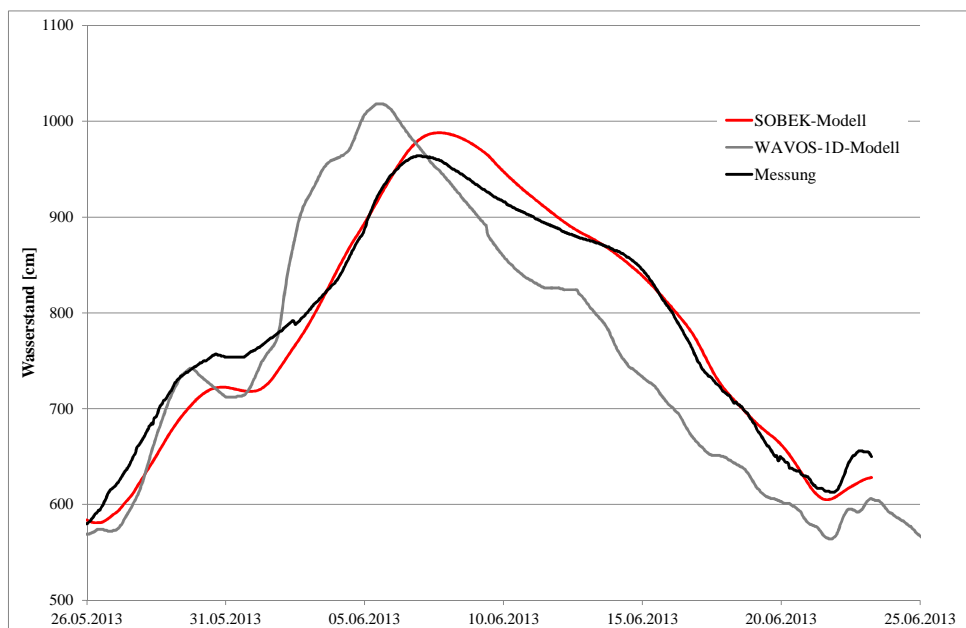


Abbildung 23: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Calbe-UP / Saale beim Hochwasser 2013

Ebenfalls entlang der Saale kann das SOBEK-Modell die Hochwasserwelle gut simulieren und es zeigt sich auch hier der gegenüber WAVOS-1D verbesserte zeitliche Hochwasserverlauf im Modell (Abbildung 23).

### 4.3.2 Hochwasserereignis 2011

Beim Hochwasser 2011 wird insbesondere unterstrom der Mulde- und Saale-Mündung eine erkennbare Unterschätzung der Wasserstände erkennbar, was sich auch in den statistischen Kenngrößen (siehe Tabelle 11) niederschlägt. Hier sollten die Randbedingungen noch einmal systematisch geprüft werden. Dennoch kann mit dem SOBEK-Modell der Wasserstandsverlauf an der überwiegenden Zahl der Vorhersagepegel auch beim 2011er Hochwasser gut nachgebildet werden (siehe auch Anlage A-2).

In Abbildung 24 wird exemplarisch das Ergebnis des SOBEK-Modells am Pegel Dresden dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass an diesem Pegel SOBEK- und WAVOS-1D-Ergebnisse dicht beieinander liegen, was auch belegt, dass das bestehende WAVOS-1D-Modell in der Lage ist, gute Ergebnisse zu liefern.

Tabelle 11: Güteparameter für ausgewählte Pegel für das Hochwasser 2011

Pegel	ME [cm]	MAE [cm]	RMSE [cm]	NSE [ - ]	$\Delta W$ Scheitel [cm]	$\Delta t$ Scheitel [h]
Dresden	-4.8	7.4	10.1	0.993	-11	2
Wittenberg	-4.3	9.0	12.3	0.969	10	9
Barby	-28.3	29.4	32.8	0.875	-1	11
Magdeburg	-16.9	18.7	21.4	0.952	-10	17
Wittenberge	-17.4	17.8	21.6	0.936	-16	18
Dömitz	-23.5	26.8	30.3	0.886	12	16
Neu Darchau	-35.9	37.5	41.7	0.794	5	14
Calbe UP	0.3	12.7	15.9	0.984	-28	2

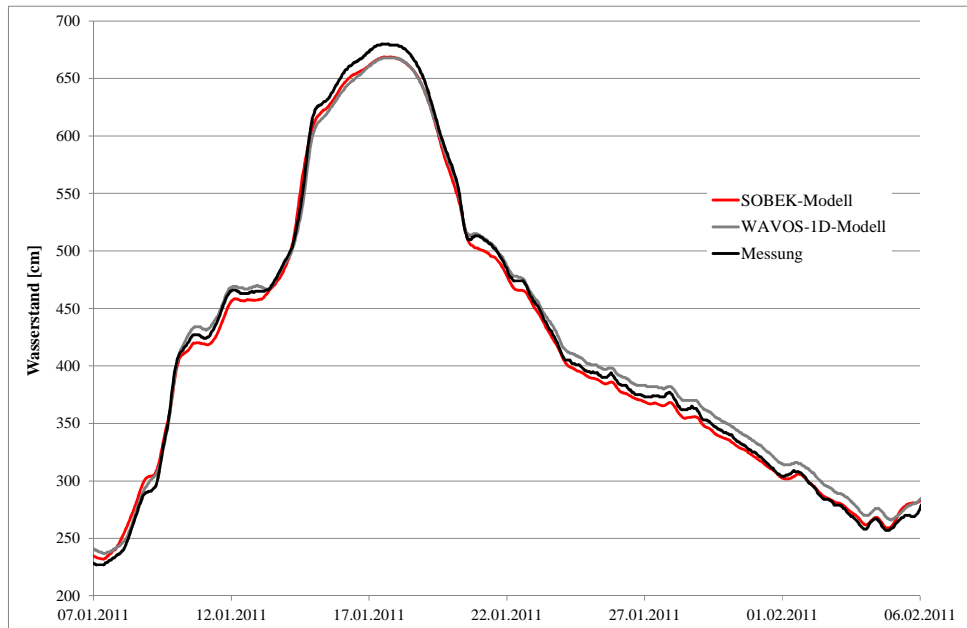


Abbildung 24: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Dresden beim Hochwasser 2011

Wie Abbildung 25 zeigt, sind beide Modelle (SOBEK sowie WAVOS-1D) am Pegel Barby nur bedingt in der Lage, den ansteigenden und abfallenden Ast der Hochwasserwelle nachzubilden. Dies ist nicht primär ein Problem der Kalibrierung der Rauheiten, da augenscheinlich Abflussvolumen im System fehlt. Der Scheitelpunkt wird, mit leichten Vorteilen für SOBEK, wiederum von beiden Modellen gut wiedergegeben.

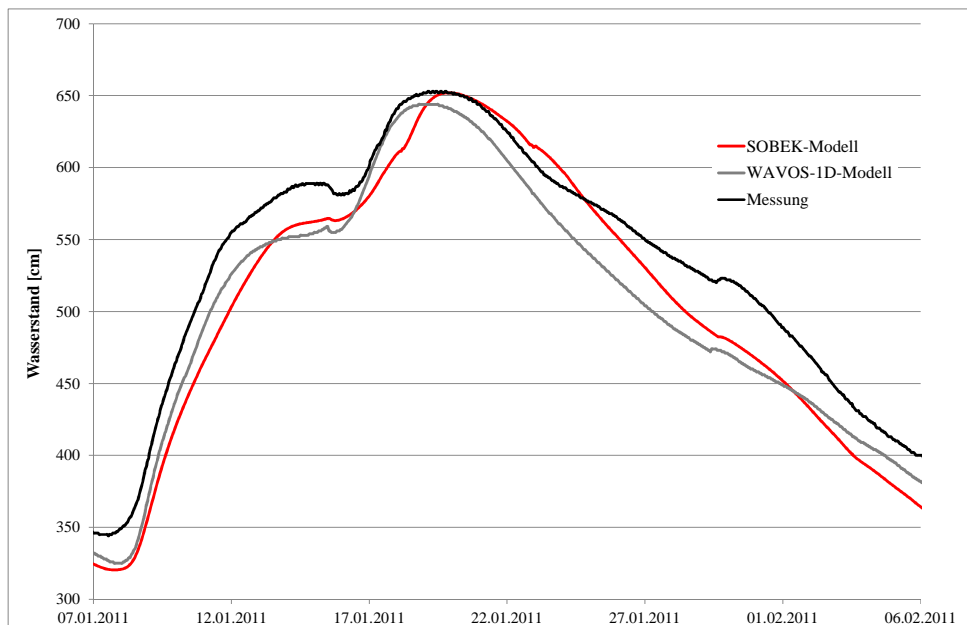


Abbildung 25: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Barby beim Hochwasser 2011

Welchen positiven Effekt die neue untere Randbedingung am Pegel Zollenspieker besitzt, zeigt Abbildung 26 anhand der Modellergebnisse für den Pegel Geesthacht beim Hochwasser 2011.

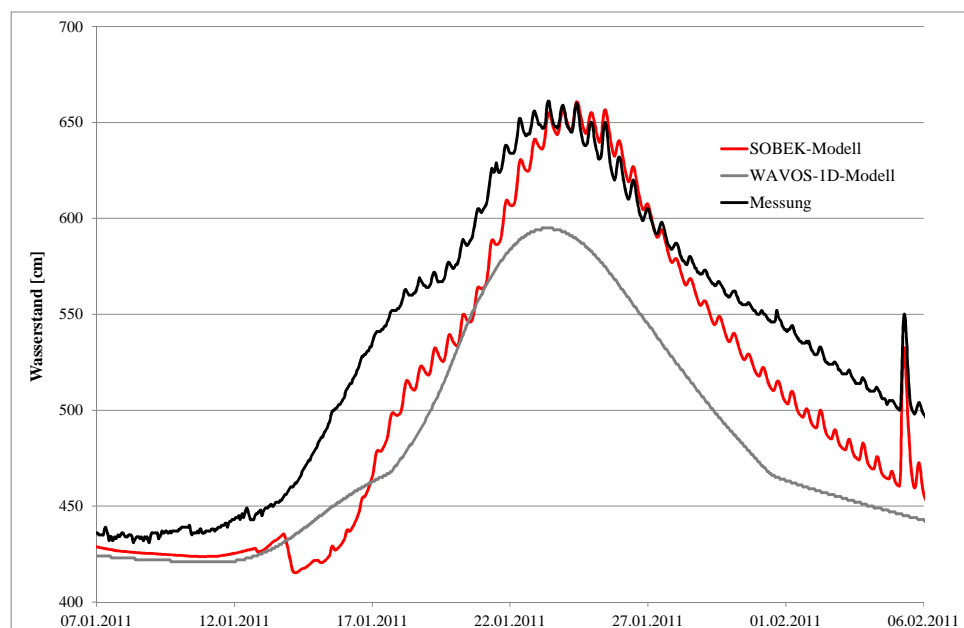


Abbildung 26: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Geesthacht beim Hochwasser 2011

### 4.3.3 Hochwasserereignis 2006 (Validierung)

Das Hochwasser 2006 wurde ausschließlich zur Modellvalidierung eingesetzt, d. h. zum Nachweis der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere, nicht zur Kalibrierung verwendete Ereignisse. Insgesamt (siehe Tabelle 12, Anlage A-3) bestätigt das 2006er Hochwasser die Güte des SOBEK-Modells. An einzelnen Pegeln zeigt sich sogar eine höhere Güte als für die zur Kalibrierung verwendeten Hochwasser. Damit bestätigt die instationäre Validierung die Anwendungsfähigkeit des kalibrierten Modells für die Hochwasservorhersage.

Tabelle 12: Güteparameter für ausgewählte Pegel für das Hochwasser 2006

Pegel	ME [cm]	MAE [cm]	RMSE [cm]	NSE [-]	$\Delta W$ Scheitel [cm]	$\Delta t$ Scheitel [h]
Dresden	-3.8	6.9	8.4	0.998	-3	2
Wittenberg	5.3	12.8	15.2	0.983	14	9
Barby	-10.6	12.9	17.6	0.982	1	15
Magdeburg	4.4	9.0	11.0	0.993	-4	31
Wittenberge	7.0	14.4	16.9	0.984	-8	17
Dömitz	7.2	15.8	18.9	0.983	22	13
Neu Darchau	1.1	17.9	20.7	0.982	8	4
Calbe UP	25.7	26.7	28.9	0.891	13	11

Das Ergebnis des SOBEK-Modells (sowie des bestehenden WAVOS-1D-Modells) für den Pegel Magdeburg-Strombrücke zeigt Abbildung 27. Sowohl die Wellenform als auch die Scheitelwasserstände werden gut vom Modell simuliert.

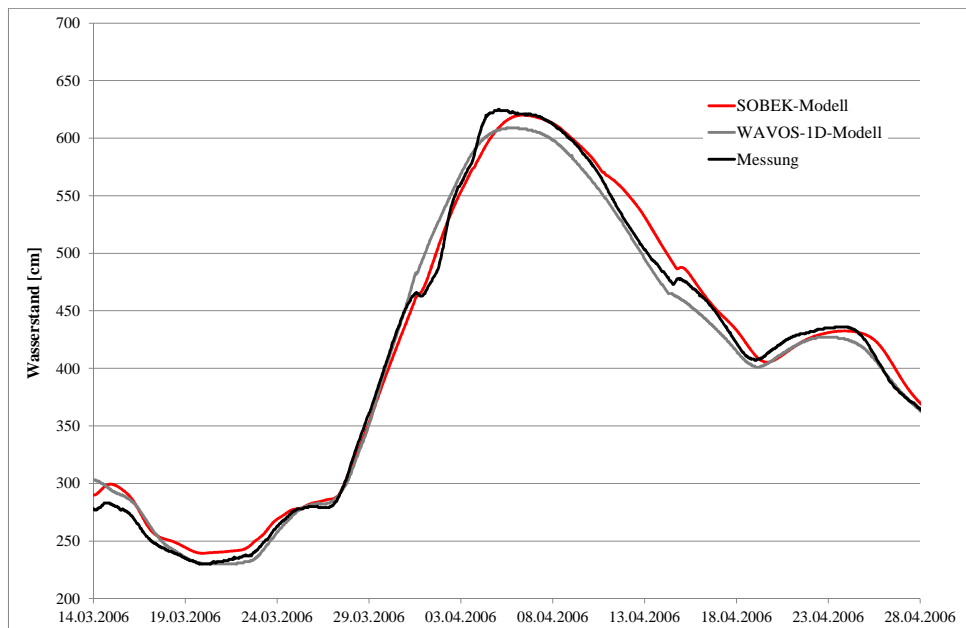


Abbildung 27: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Magdeburg-Strombrücke beim Hochwasser 2006

Auch an den Pegeln Neu Darchau und Hohnstorf ist das SOBEK-Ergebnis als gut zu bezeichnen, was auch auf das WAVOS-1D-Modell zutrifft (Abbildung 28, Abbildung 29). Die Tendenz des zeitlich verfrühten Wellenanstiegs sind im SOBEK-Modell nicht erkennbar.

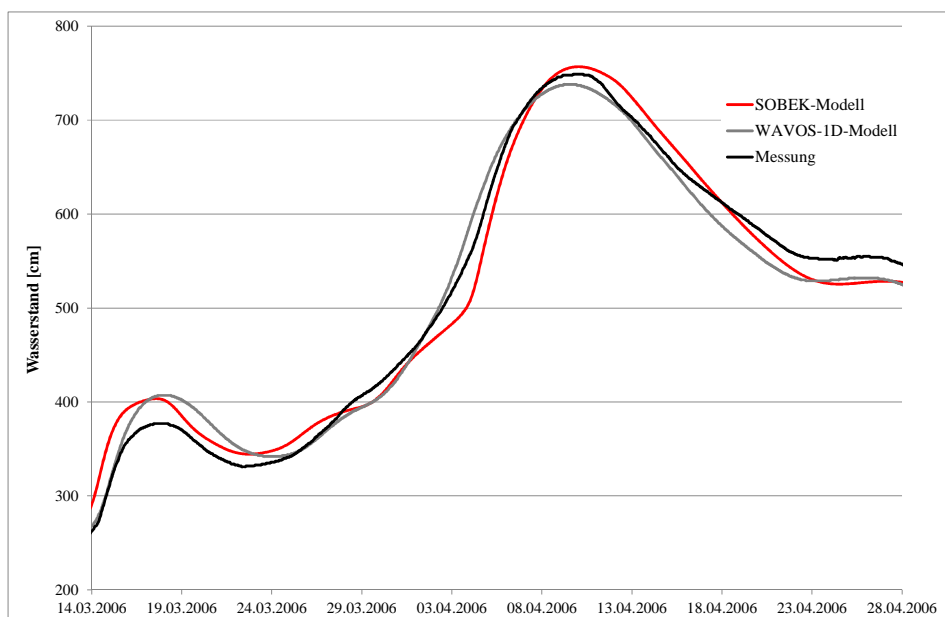


Abbildung 28: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Neu Darchau beim Hochwasser 2006

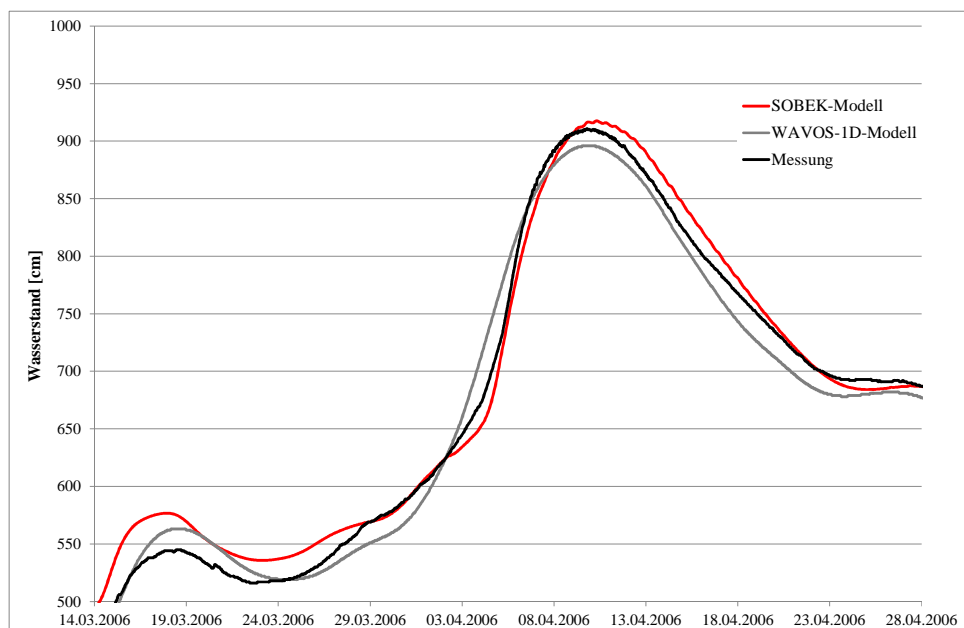


Abbildung 29: Gegenüberstellung der mit dem neuen SOBEK-Modell (rot) und dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (grau) simulierten Ganglinie mit den Messdaten (schwarz) am Pegel Hohnstorf beim Hochwasser 2006

#### 4.3.4 Hochwasserfixierung 2013 (Validierung)

Die während des Hochwassers 2013 eingemessene Wasserspiegelfixierung (siehe Tabelle 9) diente der stationären Modellvalidierung. Auch wenn das Hochwasser bereits zur instationären Kalibrierung verwendet wurde, ist das stationäre Ereignis als unabhängig zu betrachten, da sich die Wasserstand-Abfluss-Konstellation unterscheidet. Dem zeitlichen Abfluss der Fixierung folgend wurden den eingemessenen Wasserständen über räumlich benachbarte Pegel Abflüsse zugeordnet. Diese galt es entsprechend im Modell einzustellen. Das Ergebnis der stationären Validierung ist in Abbildung 30 anhand der Gegenüberstellung der fixierten und simulierten Wasserstände zwischen Elbe-km 108 (Bereich Riesa) und Elbe-km 583 (Bereich Geesthacht) dargestellt. Auf der zweiten y-Achse sind auch die Differenzen an den ca. 2400 Vergleichspunkten (im Schnitt alle 200 m) im Längsschnitt aufgetragen.

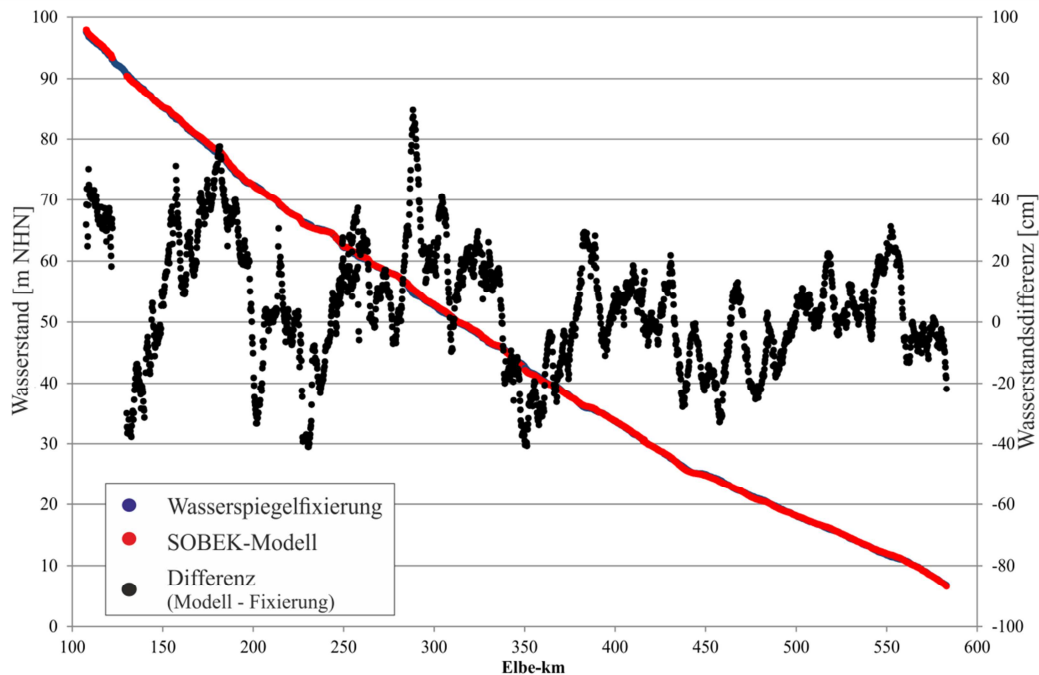


Abbildung 30: Stationäre Modellvalidierung anhand der Wasserspiegelfixierung 2013, Vergleich der Messwerte (blau) und Modellergebnisse (rot) und Darstellung der Differenzen (schwarz) zwischen Elbe-km 108 und 583

Fixierung und Modellergebnis schwanken umeinander, wobei sich tendenziell im Bereich zwischen Elbe-km 108 und 350 lokal größere Differenzen einstellen als im weiter unterstrom gelegenen Bereich. Diese hängt z. T. auch mit der Zuweisung der Abflüsse sowie mit der Unterteilung der Messung auf unterschiedliche Tage zusammen. Gerade auch im Bereich der Übergänge zwischen unterschiedlichen Tagen der Erfassung zeigen sich größere Differenzen. Insgesamt sind an rund Zweidrittel aller Vergleichspunkte die Abweichungen zwischen Modell und Messung kleiner als 20 cm, in rund 85 % der Fälle kleiner 30 cm.

Abbildung 31 stellt den Abschnitt zwischen Havelmündung und Geesthacht noch einmal vergrößert dar. Hier zeigen sich bei der instationären Kalibrierung Überschätzungen der Scheitelbereiche. Diese Tendenz ist für die Fixierung nicht erkennbar. Der wesentliche Unterschied zwischen stationärer und instationärer Betrachtung sind, wie zuvor erläutert, die Abflüsse im Modell. Beispielsweise beträgt bei der stationären Berechnung der Abfluss am Pegel Neu Darchau 4080 m<sup>3</sup>/s (entspricht laut Abflusstafel dem fixierten Wasserstand von 13,56 m NHN). In der instationären Simulation – hier resultiert der Abfluss aus der Konstellation der Zuflüsse sowie den zahlreichen anthropogenen Einflüssen (insbesondere Deichbrüche und Einsatz der Havel zur Scheitelkappung) – beträgt der Scheitelabfluss über 4600 m<sup>3</sup>/s, so dass auch der Wasserstand vom Modell um rund 50 cm überschätzt wird.

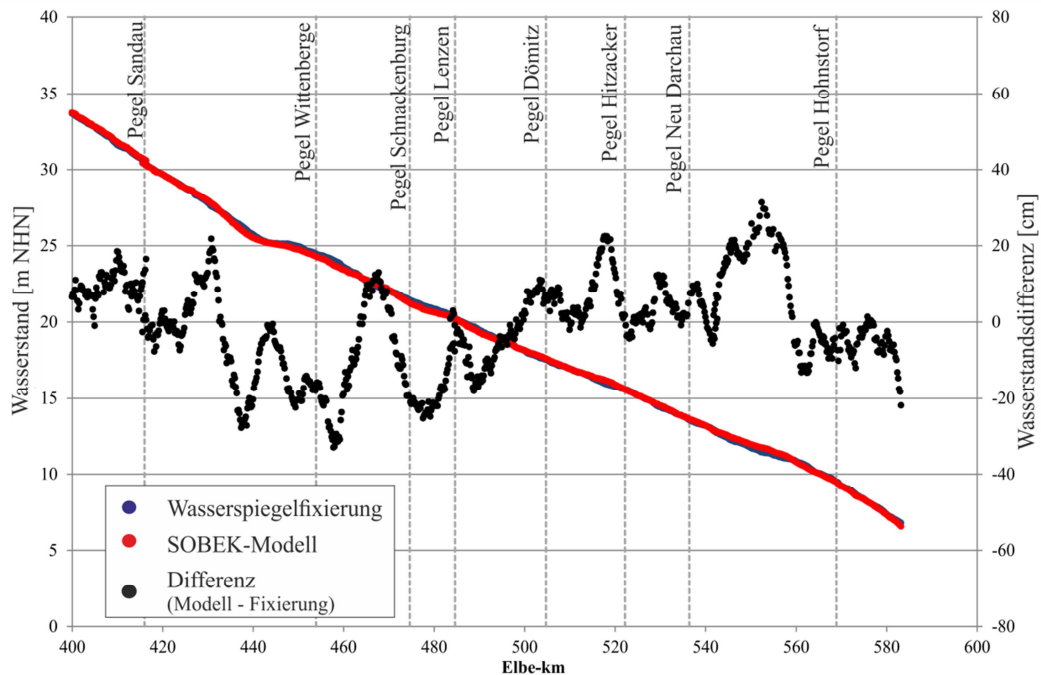


Abbildung 31: Stationäre Modellvalidierung anhand der Wasserspiegelfixierung 2013, Ausschnitt auf den Bereich Elbe-km 400 – 583 (blau: Messung, rot: Simulation, schwarz: Differenz)

Insgesamt liegen in diesem Abschnitt die Differenzen größtenteils zwischen +/- 20 cm, an den Pegel mitunter deutlich darunter (Pegel Lenzen: -7 cm, Pegel Dömitz: +7 cm, Pegel Hitzacker: +2 cm, Pegel Neu Darchau: +5 cm, Pegel Boizenburg: +1 cm, Pegel Hohnstorf: -7 cm). Damit bestätigt insgesamt auch die stationäre Modellvalidierung die Ergebnisse aus der Kalibrierung und belegt die Übertragbarkeit des Modells. Damit bestätigt die Validierung, dass das aktualisierte Modell auch im extremen Hochwasserbereich als trotz aller Unsicherheiten als gut kalibriert angesehen werden kann.

#### 4.4 Interaktion Oberflächengewässer – Grundwasser

Die in der Vorhabensbeschreibung angedachte Untersuchung der Interaktion Oberflächengewässer mit Grundwasser war durch die Erfahrungen mit dem bisherigen Vorhersagemodell motiviert. Die Laufzeit der Hochwasserwellen ist in zahlreichen Fällen der Vergangenheit im WAVOS-1D – Modell zu gering ausgefallen, d. h. der Wellenablauf im Modell erfolgte schneller als in Realität. Dies beeinflusst zum einen unmittelbar die Güte der Vorhersage, da neben der Höhe des Wasserstands auch die Eintrittszeitpunkte des Hochwasserscheitels sowie relevanter Wasserstände im Wellenverlauf (z. B. zur Beurteilung des Einsatzzeitpunkts einer (mobilen) Hochwasserschutzanlage) ein wichtiges Kriterium darstellt. Hinzu kommt, dass eine Abweichung der Wellenablaufgeschwindigkeit im Vorfluter auch die modellierte Interaktion mit den Hochwasserwellen der Zuflüsse nachteilig beeinflussen kann, was zusätzlich die Vorhersage nachteilig beeinflusst. Ein weiterer Aspekt, der maßgeblich durch Unterschiede in der Wellenablaufgeschwindigkeit zwischen Messung und Modell beeinflusst wird, ist das „Einhängen“ der Vorhersage zum Vorhersagezeitpunkt an den letzten Messwert. Ist z. B. der Unterschied zwischen Modellergebnis und Messung bedingt durch einen zu schnellen Anstieg der Hochwasserwelle im Modell relativ groß, so wird beim „Einhängen“ die Vorher-



sage nach unten korrigiert. Dies bedeutet, dass eine von der Wasserstands- oder Scheitelhöhe gute Vorhersage auch maßgeblich in ihrer Höhe beeinflusst wird und die Gefahr einer deutlichen Unterschätzung der Wasserstände besteht.

Im Zwischenbericht (BfG 2017) wurde bereits auf Basis einer ersten Recherche zu verfügbaren Grundwasserdaten festgestellt, dass die Datenlage äußerst heterogen und komplex ist und die Nutzbarkeit im operationellen Betrieb entsprechend fraglich. Demzufolge wurde festgelegt, weiterführende Untersuchungen nur dann durchzuführen, wenn sich (auch) im SOBEK-Modell zeigen sollte, dass die Hochwasserwelle deutlich zu schnell abgebildet wird und die Berücksichtigung einer Fluss- Grundwasser-Interaktion als einzige Möglichkeit einer diesbezüglichen Verbesserung verbleibt. Die im Kapitel 4.3 vorgestellten Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse deuten nicht auf das Erfordernis zur Berücksichtigung von Grundwassereinflüssen hin. Auch die Abflussbilanzen der drei betrachteten Hochwasserereignisse geben keinen Anlass, den Grundwasseraspekt im Kontext der Erstellung bzw. Aktualisierung des Hochwasservorhersagemodells weiter zu verfolgen.

## 4.5 Untersuchung zur Einbindung von 2D-Abschnitten

Im Zuge der Aktualisierung des Hochwasservorhersagemodells spielen 2D-Modelle eine wichtige Rolle, auch ohne dass diese explizit in das operationelle Modell implementiert werden. Zunächst stammen zahlreiche Gewässerbett-, Vorland- und Bauwerksdaten aus 2D-Modellen, die insbesondere bei den Bundesländern vorgehalten werden (BfG 2017). Diese Daten sind essentiell um abschnittsweise die Querprofile des SOBEK-Basismodells (siehe Kapitel 2.1) zu aktualisieren. Darüber hinaus wurden Ergebnisse von 2D-Modellen, insbesondere im Bereich von Mulde und Saale, genutzt, um die für ein 1D-Modell erforderliche Festlegung der durchströmten Querprofilbereiche festzulegen. Bereits im Rahmen der Erstellung des SOBEK-Basismodells wurden in zwei Abschnitten entlang der Elbe (Mäanderstrecke bei Coswig, Mündungsbereich der Schwarzen Elster) vereinfachte 2D-Modell mittels SOBEK (Version Rural - Overland Flow (2D)) aufgestellt, um in diesen Abschnitten gezielt Informationen über die Bedeutung des Vorlandes für das Abflussgeschehen und die Abflussaufteilung zwischen Hauptstrom und möglichen Kurzschlusssträngen zu ermitteln (siehe Abbildung 32). Die Erkenntnisse sind in die Festlegung entsprechender Verzweigungen sowie in die Anpassung der Abflussleistung der zusätzlichen Modellstränge eingeflossen (ARGE SOBEK-Elbe 2009).

Die Rechenzeiten des aktualisierten SOBEK-Modells liegen für Hochwasserereignisse (Mittel der Hochwasser 2006, 2011, 2013) bei ca. 20 Sekunden pro simulierten Tag. Dies bedeutet für einen typischen Hochwasservorhersagelauf der Elbe mit einem Vorhersagezeitraum von 8 Tagen und einem Simulations- / Updatezeitraum von 2 Tagen eine Berechnungsdauer von gut 3 Minuten. Die Rechenzeiten liegen damit leicht höher als im Fall des bestehenden WAVOS-1D – Modells, aber weiterhin in einem akzeptablen Bereich, der es auch ermöglicht, Varianten (z. B. in Bezug auf die Zuflussrandbedingungen) von unterschiedlichen Berechnungsläufen zu betrachten. Dass die Rechenzeit höher ausfällt ist auch vor dem Hintergrund der gestiegenen Modellkomplexität gegenüber dem WAVOS-1D – Modell plausibel.

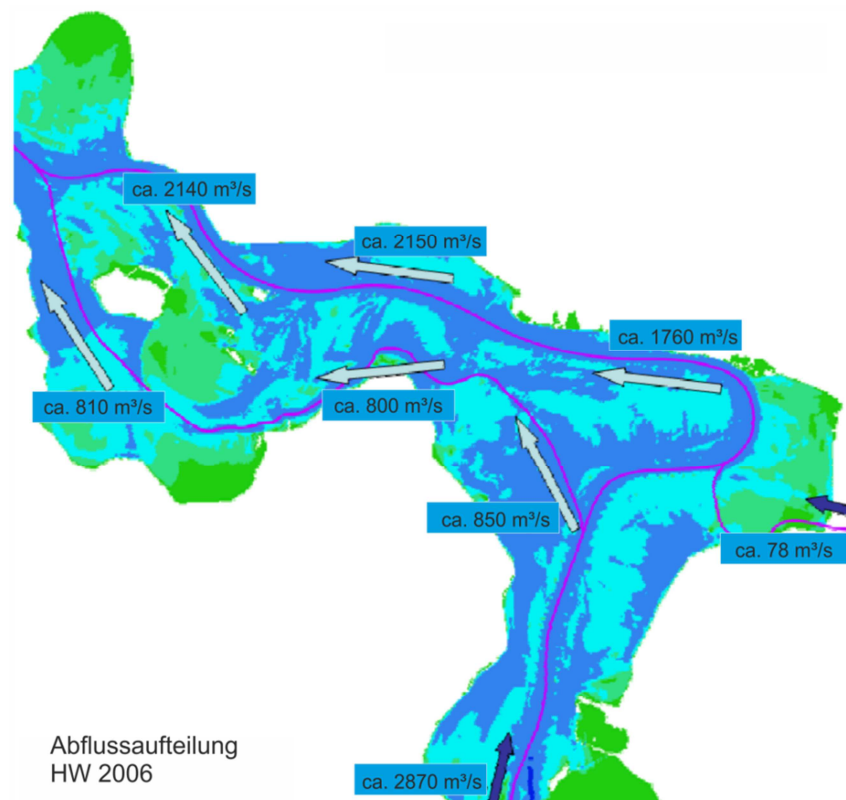


Abbildung 32: Abflussaufteilung / Kurzschlussströmungen im Mündungsbereich Schwarze Elster, 2D-Simulation mit SOBEK (Version Rural) für das HW2006 (Quelle: ARGE SOBEK Elbe 2009)

Die Einbindung von 2D-Modellen in großräumige, operationelle Vorhersagemodelle ist weiterhin vor dem Hintergrund der Rechenzeiten nicht praktikabel. Ein nächster Entwicklungsschritt, der z. B. im Zug der Pflege und Fortschreibung des Vorhersageinstrumentariums untersucht werden könnte, wäre der Einsatz über die Wasserstandshöhe gekoppelter 1D-2D-Modellansätze, wie es die Software SOBEK technisch ermöglicht. Hierbei werden die Fluss-schläuche einschließlich der Bauwerke eindimensional simuliert, während die Vorländer im Fall von Ausuferungen mit einem (vergrößerten) zweidimensionalen Modellnetz überzogen sind und eine mehrdimensionale Betrachtung ohne starre Festlegung der Fließpfade erlauben.

## 5 Analyse der Unsicherheiten des aktualisierten Vorhersagemodells für den Hochwasserfall

In Anlehnung an den Zwischenbericht und ergänzend zu den in den Kapiteln 4.3.1 bis 4.3.3 dargestellten Ergebnissen der Kalibrierung und Validierung wird zunächst die Unsicherheit des aktualisierten Vorhersagemodells in Bezug auf Höhe (Kapitel 5.1) und Eintrittszeitpunkt (Kapitel 5.2) der Hochwasserscheitel entlang der Elbe analysiert. Grundlage hierfür sind kontinuierliche Simulationen der drei ausgewählten Hochwasserereignisse. In einem zweiten Schritt (Kapitel 5.3) wird mittels sog. Hindcasts, d. h. täglicher retrospektiver Vorhersagen, der Vorhersageeinsatz nachempfunden. Um auch hier die Modellunsicherheit erfassen zu können, werden als Zuflussvorhersagen gemessene bzw. aus gemessenen Wasserständen ermittelte Abflüsse (also quasi „perfekte“ Zuflussvorhersagen) verwendet. Des Weiteren werden die übrigen Randbedingungen wie z.B. Wehr- bzw. Poldersteuerung oder auch aufgetretene Deichbrüche entsprechend ihres realen Einsatzes bzw. Auftretens bestmöglich berücksichtigt (BfG 2017).

### 5.1 Analyse der Scheitelwerte

Die Auswertung der Scheitelwerte erfolgt analog zum Zwischenbericht (BfG 2017). Hierbei werden ausschließlich die maximalen Wasserstände in den Simulationen mit dem bestehenden WAVOS-1D – Modell sowie dem aktuellen SOBEK-Modell den Messwerten für alle Vorhersagepegel entlang der Elbe gegenübergestellt. Eine zeitliche Komponente spielt an dieser Stelle keine Rolle (siehe dazu Kapitel 5.2). Zur besseren Lesbarkeit werden die Längsschnitte für jede der drei Hochwasserereignisse separat dargestellt (Abbildung 33 bis Abbildung 35).

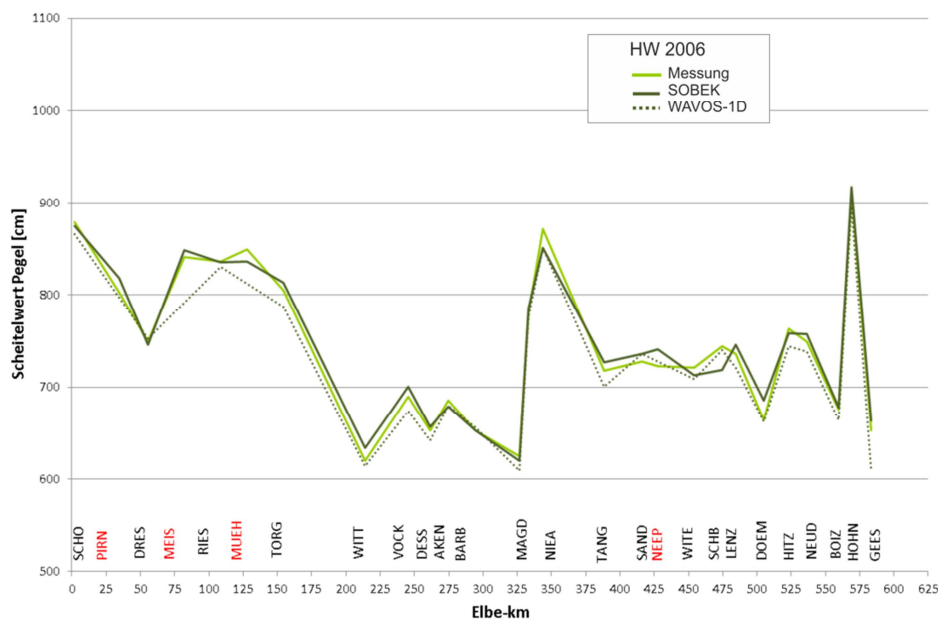


Abbildung 33: Längsschnitt der Scheitelwerte (gemessen, simuliert mit dem WAVOS-1D - Modell, simuliert mit dem SOBEK-Modell) für das Hochwasser 2006

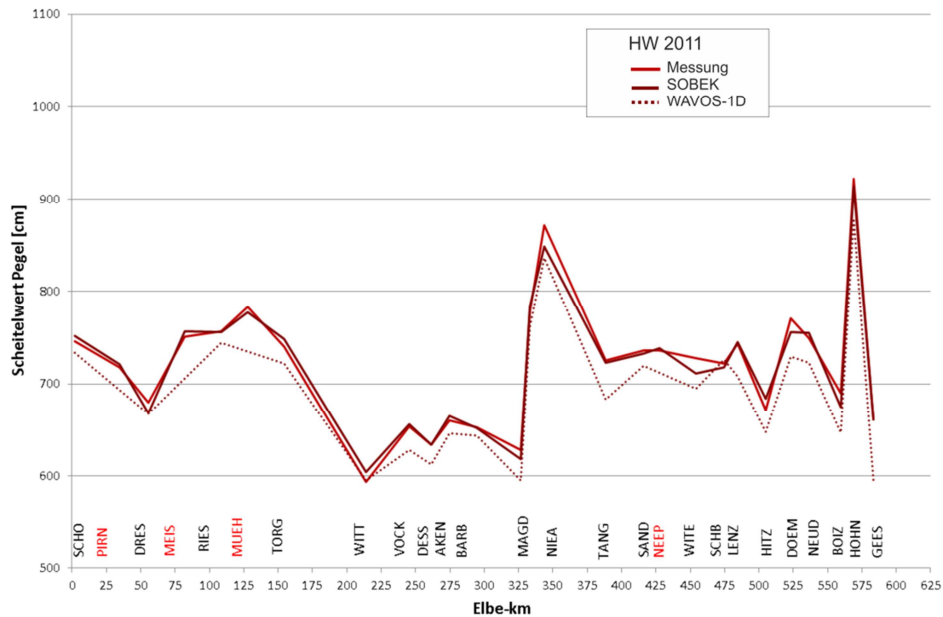


Abbildung 34: Längsschnitt der Scheitelwerte (gemessen, simuliert mit dem WAVOS-1D - Modell, simuliert mit dem SOBEK-Modell) für das Hochwasser 2011

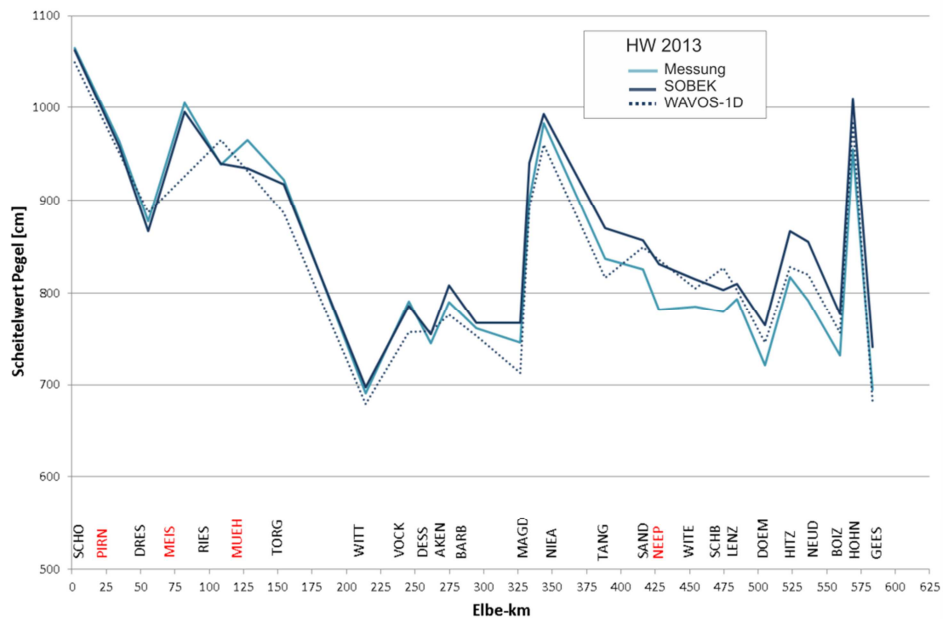


Abbildung 35: Längsschnitt der Scheitelwerte (gemessen, simuliert mit dem WAVOS-1D - Modell, simuliert mit dem SOBEK-Modell) für das Hochwasser 2013

Für die überwiegende Zahl an Pegeln für alle drei Hochwasserereignisse wird eine geringere, mitunter deutlich geringere, Scheiteldifferenz des aktualisierten SOBEK-Vorhersagemodells gegenüber dem bestehenden WAVOS-1D – Modell erkennbar. Fallen die Scheiteldifferenzen in Einzelfällen größer aus, so sind die Unterschiede mit wenigen Zentimetern gering (HW 2006: Pegel Aken, Rotensee; HW 2011: Pegel Wittenberg, HW 2013: Pegel Aken, Tanger-

münde, Sandau) oder beide Modelle weisen eine relativ große Differenz zum Messwert auf, so dass der relative Unterschied zwischen WAVOS-1D und SOBEK ebenfalls als nicht signifikant nachteilig einzustufen ist (HW 2013: Pegel Neu Darchau, Hohnstorf, Geesthacht). Ausnahme ist das Hochwasser 2006 im Bereich Lenzen. Die hier im Jahr 2009 umgesetzte Deichrückverlegung ist im SOBEK-Modell bereits enthalten, so dass an dieser Stelle das Modell nicht gänzlich die topografischen Verhältnisse beim Hochwasser 2006 abbildet und deutlichere Differenzen gegenüber WAVOS-1D sichtbar werden (Pegel Schnackenburg: -25 cm gegenüber -4 cm).

Zu beachten ist, dass für die vier rot markierten Pegel Pirna, Meißen, Mühlberg und Neuworben EP (Abbildung 33) keine WAVOS-Auswertungen vorliegen, da diese Pegel erst mit der Modellaktualisierung als Hochwasservorhersagepegel definiert wurden. Bezüglich der neu aufgenommenen Vorhersagepegel sind keine Auffälligkeiten in Bezug auf die Vorhersageunsicherheit erkennbar. Diese Pegel lassen eine vergleichbare Modellgüte wie die bestehenden Vorhersagepegel erwarten.

## 5.2 Analyse der Scheiteleintrittszeitpunkte

Neben der Scheitelhöhe spielt auch die zeitliche Komponente des Scheiteleintritts eine wichtige Rolle bei der Vorhersage. Dementsprechend wurden explizit die Abweichungen des Scheiteleintrittszeitpunkts in Stunden für die einzelnen Vorhersagepegel und Hochwasserereignisse ermittelt und in Form eines Säulendiagramms aufbereitet. Die Darstellung für das bestehende WAVOS-1D – Modell (Abbildung 36) und das neu erstellte SOBEK-Modell (Abbildung 37) erfolgt hier aus Gründen der Übersichtlichkeit getrennt. Um die zeitliche Differenz zu ermitteln, wurde für Messung und Simulation jeweils der Eintrittszeitpunkt des höchsten Wasserstands bestimmt und einander gegenübergestellt. Sofern der Scheitelwasserstand über mehrere Stunden andauerte, wurde jeweils der Mittelwert dieses Zeitraums zum Vergleich herangezogen. Abweichend vom Zwischenbericht wurde dabei keine Toleranz von 2 cm gewählt, sondern das zuvor beschriebene, strengere Kriterium zu Grunde gelegt.

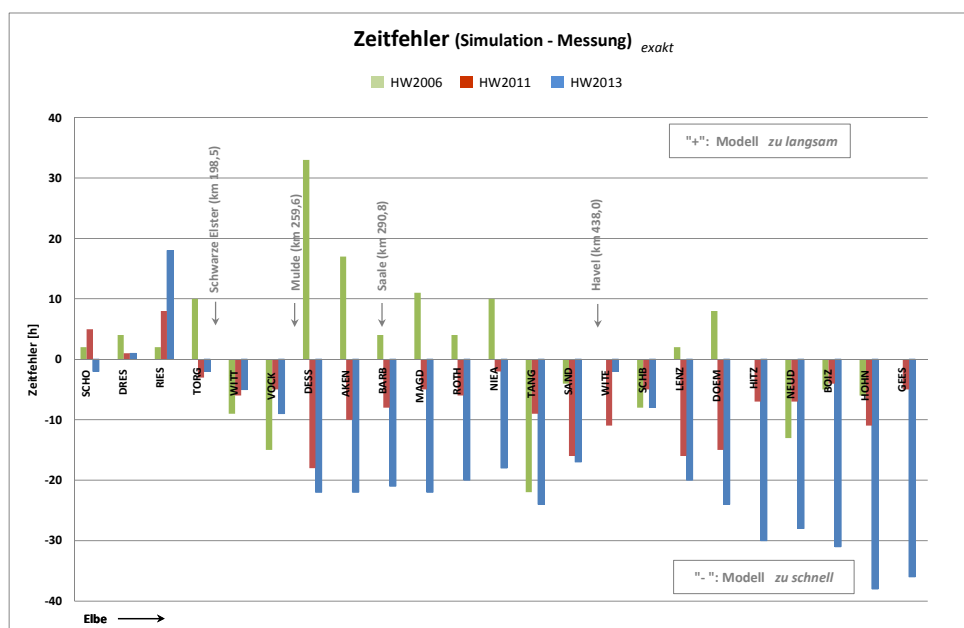


Abbildung 36: Zeitliche Abweichung des Scheiteleintrittspunkts Modell – Messung für die Hochwasser 2006, 2011 und 2013 mit dem bestehenden WAVOS-1D – Modell (ohne Projektionspegel)

Das SOBEK-Modell zeigt, wie bereits in Kapitel 4.3 dargestellt, nicht die überwiegende Tendenz eines zu schnellen Wellenablaufs wie im WAVOS-1D – Modell. Beim Hochwasser 2013 verbleibt jedoch auch im SOBEK-Modell ein verfrühter Scheiteleintritt, wenn auch weniger stark, unterhalb von Wittenberge. Dabei spielen in beiden Modellen der Effekt der Deichbrüche sowie die Scheitelkappung der Havel eine wichtige Rolle.

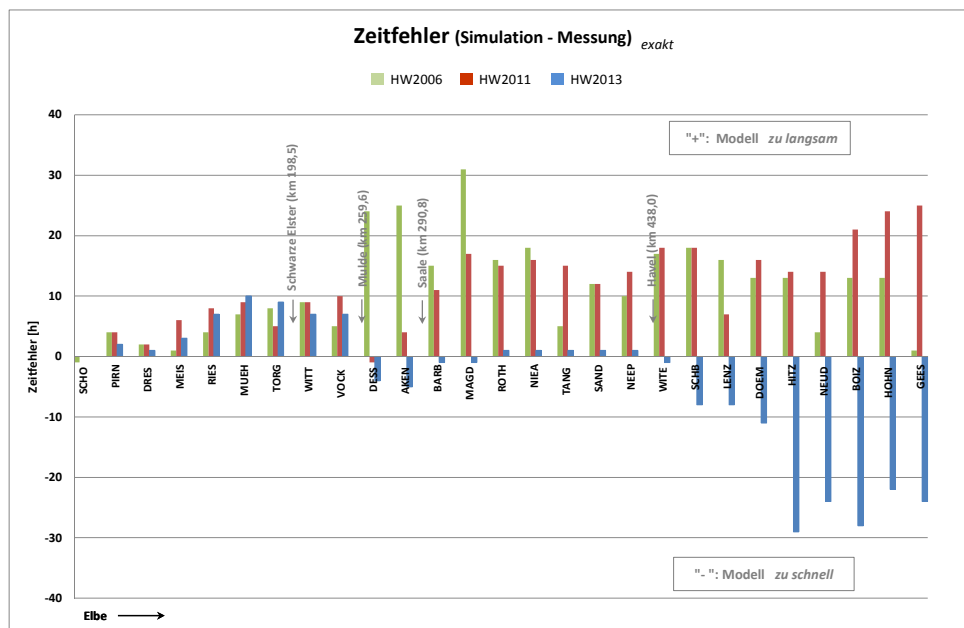


Abbildung 37: Zeitliche Abweichung des Scheiteleintrittspunkts Modell – Messung für die Hochwasser 2006, 2011 und 2013 mit dem aktuellen SOBEK – Modell

### 5.3 Statistische Analyse der Hindcast

Mit dem Ziel, die Modellunsicherheit, die insbesondere für kurze Vorhersagezeiträume einen relevanten Anteil an der gesamten Vorhersageunsicherheit besitzt, abzuschätzen, wurden Hindcast-Berechnungen für die Hochwasser 2006, 2011 und 2013 durchgeführt. Um bestmöglich die Unsicherheiten, die nicht dem Vorhersagemodell entstammen, auszuschalten, wurden im Zuge der Hindcasts sämtliche Zuflüsse zum Modell aus Messwerten abgeleitet (anstatt der Zuflussvorhersagen im operationellen Betrieb). Zudem wurden die Polder/Speicher entsprechend dem realen Verlauf gesteuert und Deichbrüche bestmöglich nachgebildet. Diese im operationellen Fall nicht kalkulierbaren Einflüsse werden im Zuge der Hindcasts als bekannt angenommen. Dennoch verbleiben auch bei dieser Vorgehensweise neben den Unsicherheiten des Vorhersagemodells weiterhin die Unsicherheit der Abflusstafeln an den Modellrändern, da die gemessenen Wasserstände in Abflüsse umgerechnet werden müssen, sowie die Messunsicherheiten der Wasserstände selbst. Und auch die vereinfachte Berücksichtigung der Deichbrüche sowie der Einsatz der Havelniederung / Havelpolder birgt Unsicherheiten.

Ein zusätzlicher Aspekt, der Hindcastberechnungen von Simulationsberechnungen unterscheidet, ist die sog. Nachführung. Um Sprünge zwischen dem letzten Messwert am Vorhersagezeitpunkt und der daran anschließenden Vorhersage zu vermeiden, wird das originäre Modellergebnis im Anschluss an die eigentliche Berechnung mitunter noch einmal angepasst. Innerhalb des Vorhersagesystems WAVOS wird hierzu die Differenz zwischen Messung und Berechnung am Vorhersagezeitpunkt ermittelt und die originäre Modellausgabe gemäß einer von zwei verfügbaren Optionen an den Messwert herangeführt. Da die optimale Nachführungsroutine vom jeweiligen Vorhersagepegel aber insbesondere auch vom Vorhersagemodell abhängt, wurden mit dem aktualisierten SOBEK-Modell für beide Nachführungsvarianten Hindcasts durchgeführt und anschließend pegelspezifisch die optimale Option in Rücksprache mit Hochwasservorhersagezentrale des Landes Sachsen-Anhalt festgelegt.

Um eine größtmögliche Vergleichbarkeit zu den im Zwischenbericht dokumentierten Ergebnissen zur Modellunsicherheit des bestehenden WAVOS-1D – Modells herzustellen, wurde für das aktualisierte SOBEK-Modell sowohl hinsichtlich der Durchführung der Hindcasts als hinsichtlich der statistischen Auswertung und grafischen Ergebnisdarstellung gleichermaßen vorgegangen. Insgesamt wurden im Hindcast-Modus 282 Vorhersagen nachgerechnet (jeweils eine Vorhersage pro Tag), die sich wie folgt auf die drei Hochwasser verteilen:

- |                    |                         |                 |
|--------------------|-------------------------|-----------------|
| – Hochwasser 2006: | 01.03.2006 – 31.05.2006 | 92 Vorhersagen  |
| – Hochwasser 2011: | 10.12.2010 – 31.03.2011 | 112 Vorhersagen |
| – Hochwasser 2013: | 15.05.2013 – 31.07.2013 | 78 Vorhersagen  |

Die Auswertung der Hindcasts wurde mit dem Programm ProFoUnD (Program to assess the Forecast Uncertainty of Discharge) durchgeführt, welches seit 2008 durch die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen entwickelt wird. Im Frühjahr 2016 hat die BfG in Absprache mit den Bundesländern kleinere Anpassungen an ProFoUnD durchführen lassen, um auch innerhalb des Vorhersagesystems WAVOS erstellte Wasserstandsvorhersagen mit dem Programm statistisch auswerten zu können. Die daraus entstandene ProFoUnD-Version 7.2 (HYDRON 2016) wurde in diesem Projekt eingesetzt.

Insgesamt bestätigt die Analyse der Hindcastberechnungen die Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung. Die Modellunsicherheiten haben sich für die überwiegende Zahl der Vorhersagepegel verringert, mitunter auch deutlich. Dies trifft insbesondere für den Elbeabschnitt unterstrom der Saalemündung und die extremen Wasserstandsbereiche des 2013er Hochwassers zu. Allerdings sind auch für oberstrom gelegene Elbepegel sowie die Saalepegel und Havelberg-Stadt Verbesserungen bezogen auf die gewählten Gütemaße erkennbar. Für die Pegel (z. B. Pegel im sächsischen Abschnitt zwischen Schöna und Riesa) und Wasserstandsbereiche / Hochwasserereignisse (HW 2006, HW 2011), für die das WAVOS-1D – Modell bereits geringe Unsicherheiten gezeigt hat (BfG 2017), ergeben die Auswertungen des SOBEK-Modells keine signifikanten Veränderungen. Für keinen der betrachteten Vorhersagepegel lässt sich einer Verschlechterung in Bezug auf die Modellunsicherheit erkennen. Insbesondere konnte das auch in den Hindcasts des bestehenden WAVOS-1D - Modells sichtbare Defizit der Wellenlaufzeiten deutlich verringert werden, was sich massiv auf die Unsicherheiten im ansteigenden Wellenast bis in den Scheitelbereich an zahlreichen Pegeln, insbesondere unterstrom der Saalemündung, positiv bemerkbar macht. Dennoch ist selbstverständlich auch das aktualisierte Modell nicht perfekt und auch zukünftig werden Modellunsi-

cherheiten einen Teil der Gesamtvorhersageunsicherheit ausmachen. Im Folgenden sind exemplarisch einige Auswertungen der Modesicherheit dargestellt.

Abbildung 38 stellt die Hindcast-Ergebnisse des aktualisierten SOBEK-Modells sowie des bestehenden WAVOS-1D – Modells für den Pegel Magdeburg beim Hochwasser 2013 vergleichend gegenüber. Dargestellt sind jeweils die gemessenen Wasserstände (dicke blaue Linie) sowie zusammengesetzte Vorhersage-Ganglinien der gewählten Vorhersagelängen (farbige Linien). Hierbei werden z. B. alle 24-Stunden-Vorhersagen, obgleich an unterschiedlichen Tagen erstellt, als eine zusammenhängende Ganglinie dargestellt. Diese Art der Darstellung ermöglicht einen anschaulichen und direkten visuellen Vergleich von Messung und zugehöriger Vorhersage. Erkennbar wird, dass insbesondere im Bereich der großen Wasserstandsgradienten (ansteigender und abfallender Ast der Hochwasserwelle) das aktualisierte SOBEK-Modell eine geringere Unsicherheit aufweist als das bestehende WAVOS-1D – Modell. Die Ganglinien der Vorhersagen und der Messwerte liegen deutlich enger beieinander. Auch im sächsischen Elbeabschnitt, in dem bereits das WAVOS-1D – Modell gute Ergebnisse mit einer relativ geringen Modellunsicherheit aufweist, konnte diese Güte vom SOBEK-Modell reproduziert bzw. in Einzelfällen auch noch leicht gesteigert werden. Abbildung 39 zeigt die zuvor erläuterte Ganglinien-Grafik für den Pegel Dresden beim Hochwasser 2011. Die Hindcast-Ergebnisse mit beiden Modellen (SOBEK oben, WAVOS-1D unten) liefern eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten, wobei beide Modelle in unterschiedlichen Abschnitten der Ganglinie jeweils leicht Vorteile gegenüber dem jeweils anderen Modell besitzen.

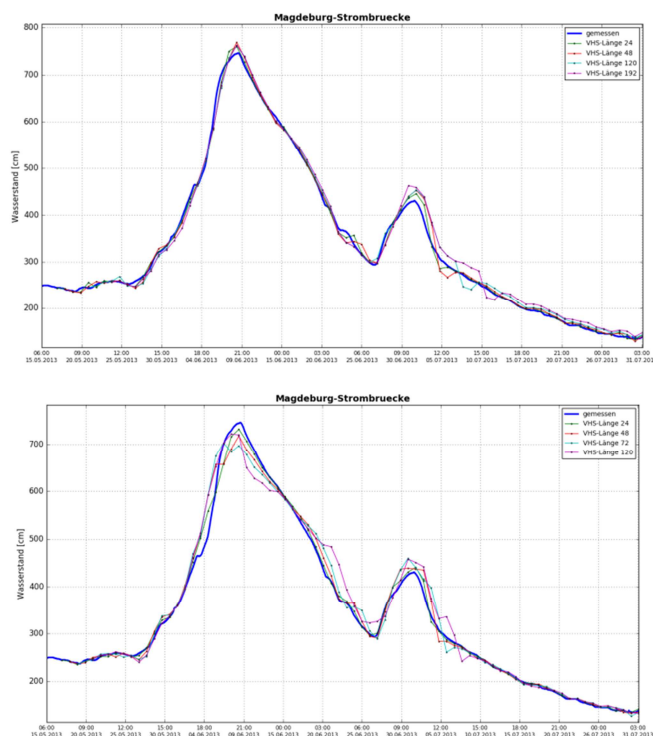


Abbildung 38: Ganglinien-Vergleich der Vorhersagen beim Hochwasser 2013 für den Pegel Magdeburg-Strombrücke mit dem SOBEK-Modell (oben) und dem WAVOS-1D - Modell (unten)



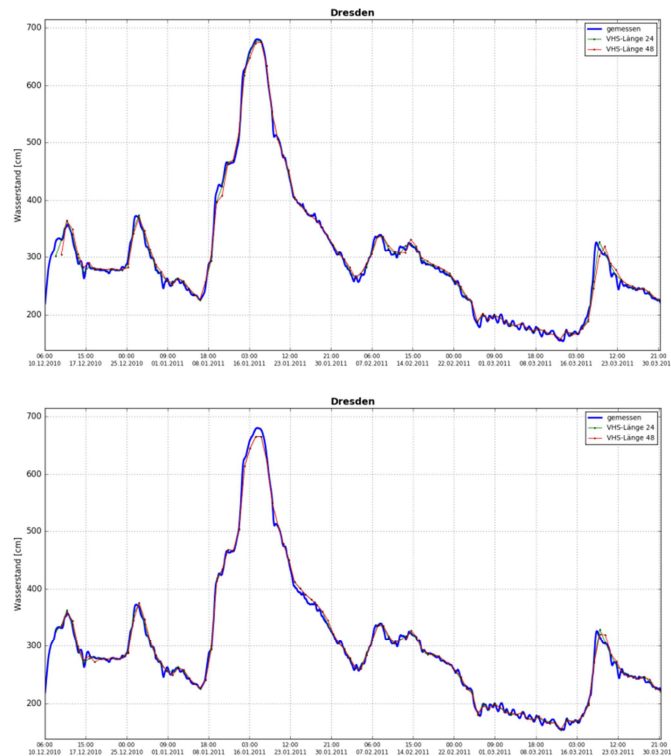


Abbildung 39: Ganglinien-Vergleich der Vorhersagen beim Hochwasser 2011 für den Pegel Dresden mit dem SOBEK-Modell (oben) und dem WAVOS-1D - Modell (unten)

Auch die Modellunsicherheit an den Elbezuflüssen Saale und Havel konnte weiter reduziert werden, wie Abbildung 40 und Abbildung 41 anhand des Hochwassers 2011 belegen. Gewählt ist hier die Darstellungsform der sog. Boxplots. Diese erlauben eine sehr kompakte Darstellung statistischer Kenngrößen der Verteilung der Differenzen zwischen Messung und Vorhersage für verschiedene Vorhersagelängen.

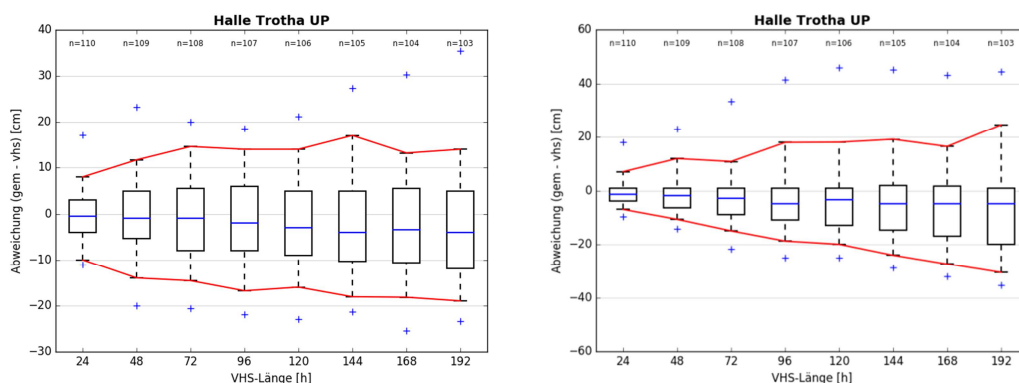


Abbildung 40: Darstellung der Modellunsicherheiten beim Hochwasser 2011 am Pegel Halle-Trotha für das SOBEK-Modell (links) sowie das WAVOS-1D – Modell (rechts) in Form von Boxplots über den Vorhersagezeitraum von 192 Stunden

Die Box im mittleren Teil repräsentiert den Bereich, in welchem 50 % der Differenzen liegen und wird somit durch das obere und untere Quartil begrenzt. Die Länge der Box entspricht somit dem Interquartilsabstand und ist ein Maß für die Datenstreuung. In der Box wird der Median als durchgehender blauer Strich eingetragen, der durch seine Lage innerhalb der Box

einen Eindruck der Verteilungsschiefe vermittelt. Die sog. Antennen („Whisker“) grenzen den Bereich des 10%- bzw. 90%-Quantils ab. Die Markierungen ober- bzw. unterhalb der Whisker repräsentieren das 5% bzw. 95%-Quantil und somit die extremere Abweichungen.

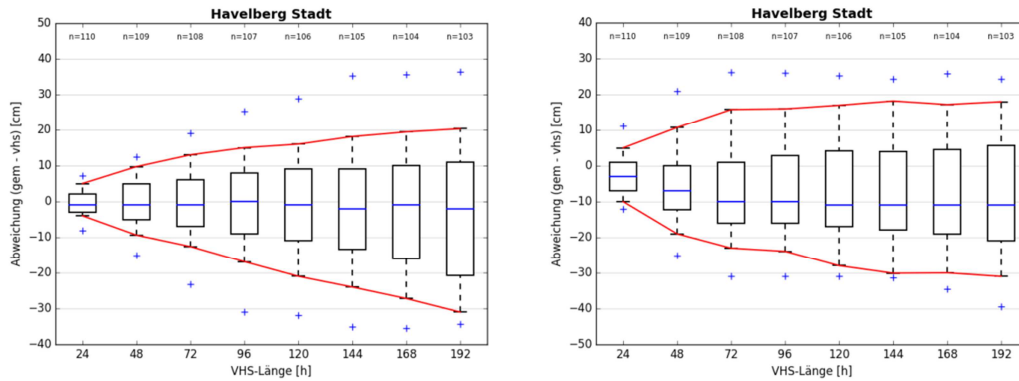


Abbildung 41: Darstellung der Modellunsicherheiten beim Hochwasser 2011 am Pegel Havelberg-Stadt für das SOBEK-Modell (links) sowie das WAVOS-1D – Modell (rechts) in Form von Boxplots über den Vorhersagezeitraum von 192 Stunden

Die Hindcasts bestätigen auch die aus den Ergebnissen der Kalibrierung und Validierung abgeleitete Aussage, dass die neu hinzugekommenen Vorhersagepegel sich hinsichtlich der Unsicherheiten in die bestehenden Pegel einfügen und es keine Besonderheiten zu erkennen gibt. Beispielhaft stellt Abbildung 42 die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Modellunsicherheiten am Pegel Meißen für das Hochwasser 2006 den Ergebnissen für den Pegel Dresden gegenüber. Erkennbar wird, dass der Pegel Meißen, obgleich unterstrom von Dresden gelegen, eine vergleichbare, mitunter sogar geringere Modellunsicherheit zeigt.

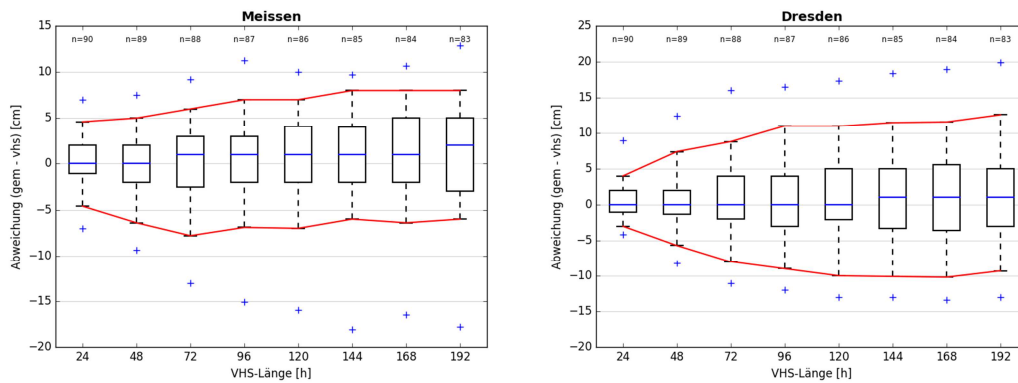


Abbildung 42: Darstellung der Modellunsicherheiten beim Hochwasser 2006 an den Pegeln Meißen (links) und Dresden (rechts) in Form von Boxplots über den Vorhersagezeitraum von 192 Stunden

Auch die am Pegel Mühlberg im Zuge der Modellkalibrierung beim 2013er Hochwasser aufgetretenen Schwierigkeit im Scheitelbereich, wirken sich für die 24- und 48-Stunden-Vorhersage kaum nachteilig aus. Durch das Nachführen der Modellergebnisse im Vorhersageprozess werden die Defizite weitestgehend ausgeglichen und Unterschiede in der Modellunsicherheit gegenüber dem nahe gelegenen Vorhersagepegel Torgau werden kaum erkennbar (siehe Abbildung 43).

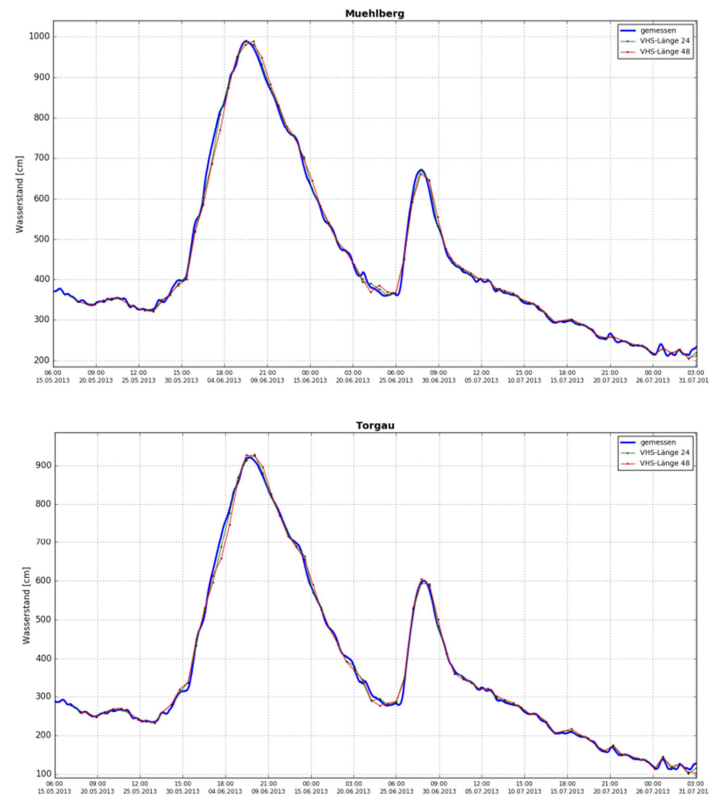


Abbildung 43: Ganglinien-Vergleich der 24- und 48-Stunden-Vorhersagen beim Hochwasser 2013 für die Pegel Mühlberg (oben) und Torgau (unten)

Für Hochwasservorhersagen ist neben den Abweichungen zu den gemessenen Wasserständen, auch in zeitlicher Hinsicht, die exakte Abbildung der Überschreitung relevanter Schwellwerte (z. B. Melde- oder Alarmstufen) ein wichtiges Gütekriterium. Kategorische Gütemaße überführen die kontinuierliche Vorhersage in eine binäre (ja-nein) Information, d.h. dass hierbei ausschließlich bewertet wird, ob die Überschreitung solcher Schwellwerte innerhalb ausgewählter Vorhersagelängen korrekt simuliert bzw. vorhergesagt wurde oder nicht. Dabei wird nicht explizit bewertet, um welche Marge der Schwellwert im Modell und in Realität überschritten wird. Auch das zeitliche Zusammenspiel findet nur insofern bei kategorischen Gütemaßen Berücksichtigung, als dass bewertet wird, ob bis zu einer definierten Vorhersagelänge (z. B. innerhalb von 24 Stunden) eine Überschreitung stattgefunden hat. In Form sog. Kontingenztafeln wird in Form einer Matrix aufgetragen, ob das Modell die Schwellwertüberschreitung („Hit“) bzw. auch die Nicht-Überschreitung („Correct Negative“) korrekt abgebildet hat. Auch die Fälle, in denen Schwellwertüberschreitung simuliert aber nicht gemessen („False Alarm“) bzw. gemessen aber nicht simuliert wurden („Miss“), werden mit der Kontingenztafel erfasst (siehe auch Anlage B).

Abbildung 44 (SOBEK-Modell) und Abbildung 45 (WAVOS-1D – Modell) stellen die 2 x 2 Kontingenztafeln für den Pegel Dömitz (Hochwasser 2013) dar. Als Schwellenwert wurde die Alarmstufe 2 gewählt.

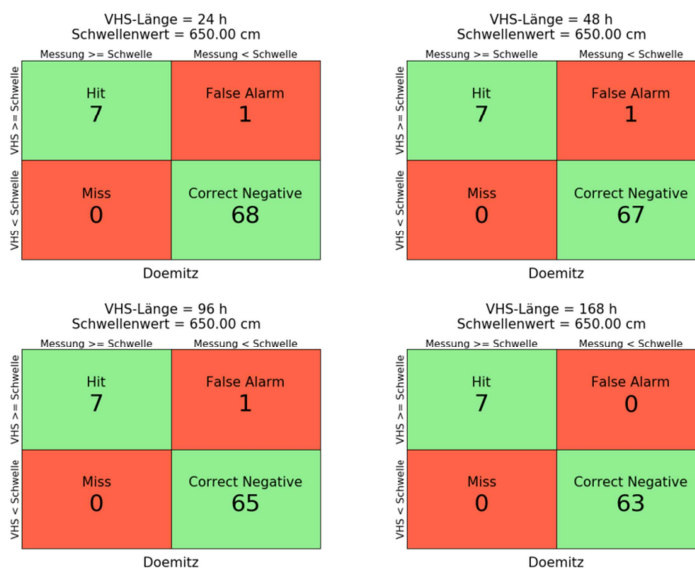


Abbildung 44: Kontingenztabelle, Pegel Dömitz, Schwellenwert 650 cm, Vorhersagelänge 24h, 48 h, 96h, 168h, Hochwasser 2013, SOBEK-Modell

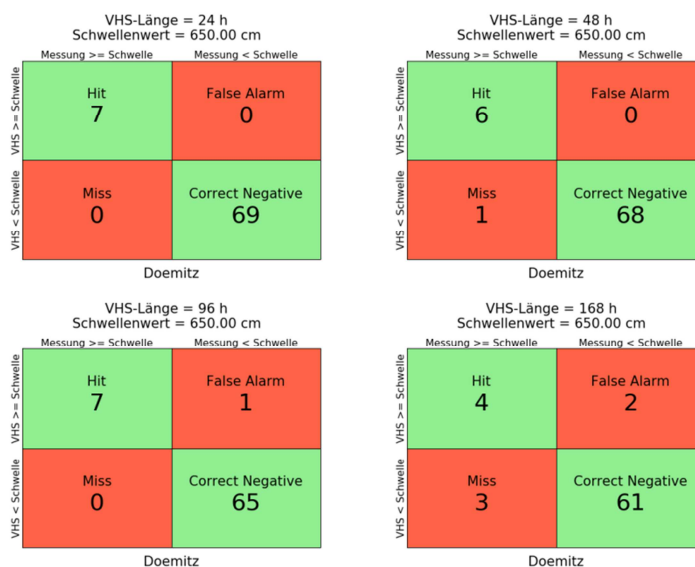


Abbildung 45: Kontingenztabelle, Pegel Dömitz, Schwellenwert 650 cm, Vorhersagelänge 24h, 48 h, 96h, 168h, Hochwasser 2013, WAVOS-1D - Modell

In Bezug auf kategorische Gütemaße lässt sich insgesamt feststellen, dass die Unterschiede in der Unsicherheit insgesamt zwischen dem SOBEK- und dem WAVOS-1D – Modell recht gering ausfallen.

Die vollständigen Auswertungen zur Modellunsicherheit an sämtlichen Vorhersagepegeln enthält der über 330 Seiten umfassende Anhang B.

## 6 Modellzustand 2018

Das zur Modellkalibrierung (siehe Kapitel 4) eingesetzte SOBEK-Modell entspricht dem um die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Aspekte aktualisierten bzw. erweiterten Basismodell. Um am Ende der Bearbeitung (Mitte 2018) ein Vorhersagemodell verfügbar zu haben, welches den aktuellen Zustand widerspiegelt, wurden in einem abschließenden Bearbeitungsschritt sämtliche Maßnahmen mit hydraulischer Relevanz für den Hochwasserabfluss, die (voraussichtlich) bis Ende 2018 / Anfang 2019 umgesetzt sein sollen (siehe Tabelle 13), implementiert. Daraus entstanden ist der „Modellzustand 2018“, der letztlich im Vorhersagesystem WAVOS (und auch KALYPSO) implementiert und zukünftig im operationellen Vorhersagebetrieb zum Einsatz kommen wird. Die Belegung von Rauheiten, Steuerungsvorschriften von Bauwerken etc. sind dabei unverändert aus dem kalibrierten Modell übernommen worden. Dieses zweistufige Vorgehen ist insofern erforderlich, als dass der Modellzustand zeitlich zu den Kalibrierereignissen passen muss, um sinnvoll das Modell an die Messdaten anzugleichen. Da nach dem jüngsten Kalibrierereignis, dem Hochwasser 2013, zahlreiche Maßnahmen mit relevantem Einfluss auf den Hochwasserwellenablauf umgesetzt wurden, war im vorliegenden Fall die Erstellung eines Modellzustands zur Kalibrierung und die anschließende Erweiterung auf den aktuellen Zustand fachlich erforderlich.

Der Zwischenbericht (BfG 2017) beschreibt in Kapitel 3.2.1.3 die berücksichtigten Hochwasserschutzmaßnahmen ausführlich, so dass an dieser Stelle auf die Implementierung der Maßnahmen im Modell fokussiert wird. Die Implementierung wurde mit der Umsetzung der im Zuge des Nationalen Hochwasserschutzprogramms (NHWSP) durchgeführten Modellaufbaus abgeglichen und die Schematisierung der Maßnahmen wurde, soweit für die Zwecke der Vorhersage sinnvoll möglich, wechselseitig übernommen. Teilweise wurde bewusst eine leicht vereinfachte Abbildung zu Gunsten der Modellperformanz gewählt, deren Einfluss auf die Maßnahmenwirksamkeit vernachlässigbar ist. Prinzipiell wurde im Fall von Poldern die Option eines sog. Speicherknotens, der über einen kurzen Modellstrang und über ein festes oder steuerbares Bauwerk an das Gewässer angeschlossen ist, gewählt. Dieser Speicherknoten erlaubt die Definition eines Rückhaltevolumens als Funktion der Geländehöhe bzw. des Wasserstands im Polder. Deichrückverlegungen wurden jeweils innerhalb der Querprofilgeometrie berücksichtigt. Sofern die entsprechenden Bereiche noch nicht im Modellgebiet bzw. in den Profilen enthalten waren, galt es die Profile mittels entsprechender Geländeinformationen zu verlängern. Andernfalls war die Höheninformation der Profile im betreffenden Bereich anzupassen.

Im Weiteren sind die wesentlichen Eckpunkte der Schematisierung im SOBEK-Modell für die 14 implementierten Maßnahmen erläutert.

### Polder Aussig

Der Polder Aussig ist aktuell noch nicht im Kontext des NHWSP-Nachweisinstrumentariums in das Modell implementiert worden. Der Polder wurde bei Elbe-km 125,3 mit einem kombinierten Ein- und Auslassbauwerk (Breite 50 m, Sohlhöhe 82.2 m NHN), dessen Höhe steuer-

bar ist, angesetzt. Sobald die Realisierung des Polders erfolgt ist, müssen die entsprechenden Parameter mit denen im Modell abgeglichen und ggf. angepasst werden.

Tabelle 13: Übersicht der im SOBEK-Modell „Zustand 2018“ berücksichtigten hochwassermin-  
dernden Maßnahmen (DRV = Deichrückverlegung)

Maßnahme	Fluss	Fluss-km	Fläche / Volumen	Berücksichtigung im Modell
<b>gesteuerte Maßnahmen</b>				
Polder Aussig	Elbe	125,3	ca. 300 ha bis zu 16 Mio. m <sup>3</sup>	Speicherknoten
Polder Löbnitz	Mulde	72,0 – 58,0	ca. 1440 ha bis zu 15 Mio. m <sup>3</sup>	Zusätzlicher Mo- dellzweig mit Spei- cherknoten, Pro- filanpassung
Polder Rösa	Mulde	62,0 – 54,0	ca. 520 ha bis zu 20 Mio. m <sup>3</sup>	Zusätzlicher Mo- dellzweig mit Spei- cherknoten, Pro- filanpassung
<b>ungesteuerte Maßnahmen</b>				
Polder Köttlitz	Elbe	130,2	ca. 300 ha bis zu 5 Mio. m <sup>3</sup>	Speicherknoten, Profilanpassung (km 128,7 - 130,2)
DRV Mauken- Klöden	Elbe	186,2 – 187,4	ca. 24 ha	Profilanpassung
Hochwasserschutz Elster-Listerfehrda	Elbe	198,8 – 202,8	-	Profilanpassung
DRV Gatzer Berg- deich	Elbe	250,0 – 253,0	ca. 215 ha	Profilanpassung
DRV Lödderitzer Forst	Elbe	278,2 – 284,2	ca. 590 ha	Profilanpassung
DRV Klietznick	Elbe	379,0 – 381,4	ca. 100 ha	Profilanpassung
Austrassierung Fischbeck	Elbe	382,4 – 390,0	ca. 100 ha	Profilanpassung
DRV Sandau-Nord	Elbe	417,6 – 420,6	ca. 60 ha	Profilanpassung
DRV Altjeßnitz	Mulde	33,0 – 28,0	ca. 125 ha	Profilanpassung
DRV Priorau-Möst	Mulde	18,7 – 22,5	ca. 50 ha	Profilanpassung
DRV Dessau-Törten	Mulde	14,2 – 16,3	ca. 30 ha	Profilanpassung

#### Polder Löbnitz

Der Polder Löbnitz ist aktuell noch nicht im Kontext des NHWSP-Nachweisinstrumentariums in das Modell implementiert worden. Die Abbildung des Polders Löbnitz im Vorhersagemodell erfolgte in Anlehnung an die Vorgehensweise beim nahegelegenen Polder Rösa (s.u.). Bei beiden Maßnahmen ist die Einführung eines zusätzlichen Modellzweigs erforderlich, um das parallel zum Gewässerverlauf der Mulde stattfindende Strömen des Wassers innerhalb dieser langgestreckten Maßnahme abbilden zu können (siehe

Abbildung 46). Das Einlaufbauwerk besteht aus einem steuerbaren Teil (Breite 40 m) und einer festen Überlaufschwelle von 275 Länge (Höhe: 90,5 m NHN). Das Auslaufbauwerk ist ebenfalls zweigeteilt und besteht aus dem steuerbaren Bauwerk (Breite: 40m) und einer festen Schwelle (Länge: 300 m, Höhe 84,62 m NHN).

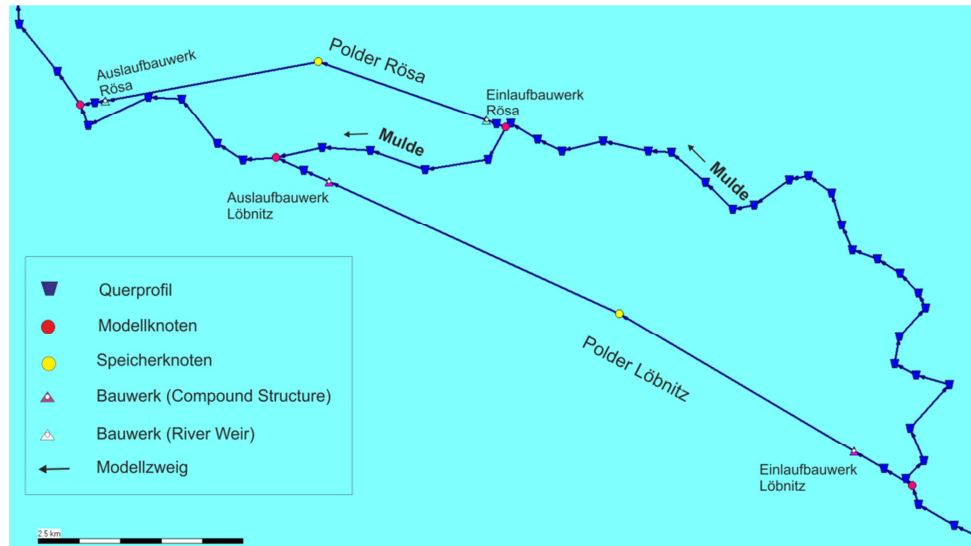


Abbildung 46: Schematisierung der Polder Löbnitz und Rösa an der Mulde im SOBEK-Modell

#### Polder Rösa

Der in unmittelbarer Nähe zum Polder Löbnitz gelegene Polder Rösa (siehe Abbildung 46) wurde ebenfalls in Form eines zusätzlichen, parallel zur Mulde verlaufenden Modellzweigs abgebildet, welcher über ein steuerbares Ein- (Breite 88 m) bzw. Auslassbauwerk (Breite: 15 m) an das Hauptgewässer angeschlossen sind. Die Wasserstands-Volumen-Beziehung des Polders wurde auf Basis des DGM im entsprechenden Bereich ermittelt.

#### Polder Köttlitz

Der Polder Köttlitz wurde wie der Polder Aussig in Form eines Speicherknöten im Modell abgebildet. Das wasserstandsabhängige Retentionsvolumen wurde auf Grundlage des DGMs im Bereich des Polders ermittelt. Das Ein- / Auslaufbauwerk ist als feste Wehrschwelle (Breite: 30 m, Höhe: 89,6 n NHN) modelliert.

#### Deichrückverlegung Mauken-Klöden

Die Querprofile der Modellvariante „Kalibrierung“ wurden im Bereich der Deichrückverlegung bis an die neue Modellgrenze verlängert. Im Gegensatz zur Deichrückverlegung Lödderitzer Forst (s.u.) wird auf Grund der Lage der Deichrückverlegung Mauken-Klöden davon ausgegangen, dass ein Teil der Fläche aktiv am Abflussgeschehen beteiligt ist und mitströmt (siehe Abbildung 47).

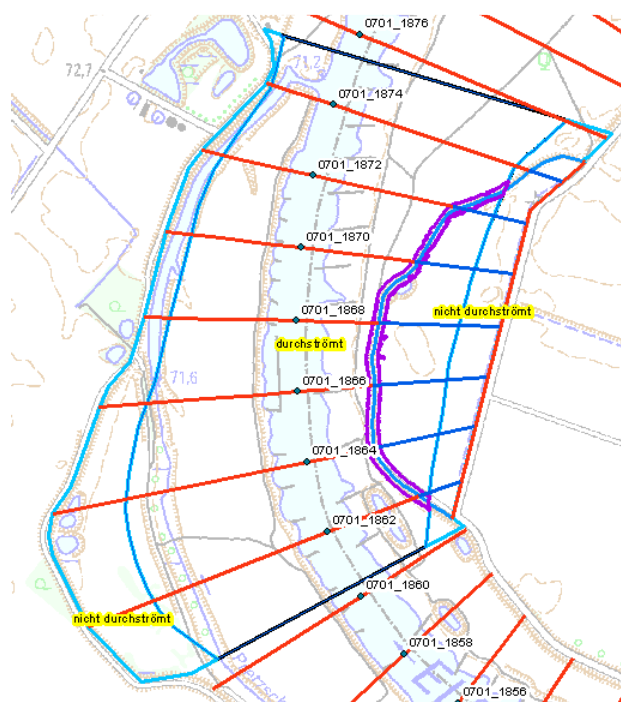


Abbildung 47: Verlängerte Querprofilspuren (blau) im Bereich der DRV Mauken-Klößen

#### Hochwasserschutz Elster-Listerfehrda

Der neue Deichverlauf des Hochwasserschutzes Elster-Listerfehrda wurde in die 21 Querprofile zwischen Elbe-km 198,8 bis 202,8, die mittels ArcSOBEK neu generiert wurden, eingebaut.

#### Deichrückverlegung Gatzter Bergdeich

Die Deichrückverlegung Gatzter Bergdeich wurde innerhalb der 21 im Bereich der Maßnahme gelegenen Querprofile abgebildet. Die Profile wurden mit dem GIS-Werkzeug ArcSOBEK (siehe Kapitel 3) neu generiert. Zuvor erfolgte eine Anpassung der Querprofilverläufe. Insbesondere galt es die Profilsuren im Bereich des rückverlegten Deichs zu verlängern. Der bis dato fehlende Bereich des DGM-W konnte durch DGM1-Daten des Landes Sachsen-Anhalt ergänzt werden.

#### Deichrückverlegung Lödderitzer Forst

Auch im Bereich der Deichrückverlegung Lödderitzer Forst wurden die Querprofile mittels ArcSOBEK (Kapitel 3) neu generiert. Auf Grund der zahlreichen Deichschlitzungen wird davon ausgegangen, dass sich die Fläche relativ gleichmäßig im Längsverlauf füllt, so dass sämtliche Querprofile verlängert wurden (Abbildung 48). Der Fläche der Deichrückverlegung wird ausschließlich eine speichernde Wirkung zugeschrieben, während der Bereich zwischen Elbe und Altdeich als durchströmt definiert worden ist.



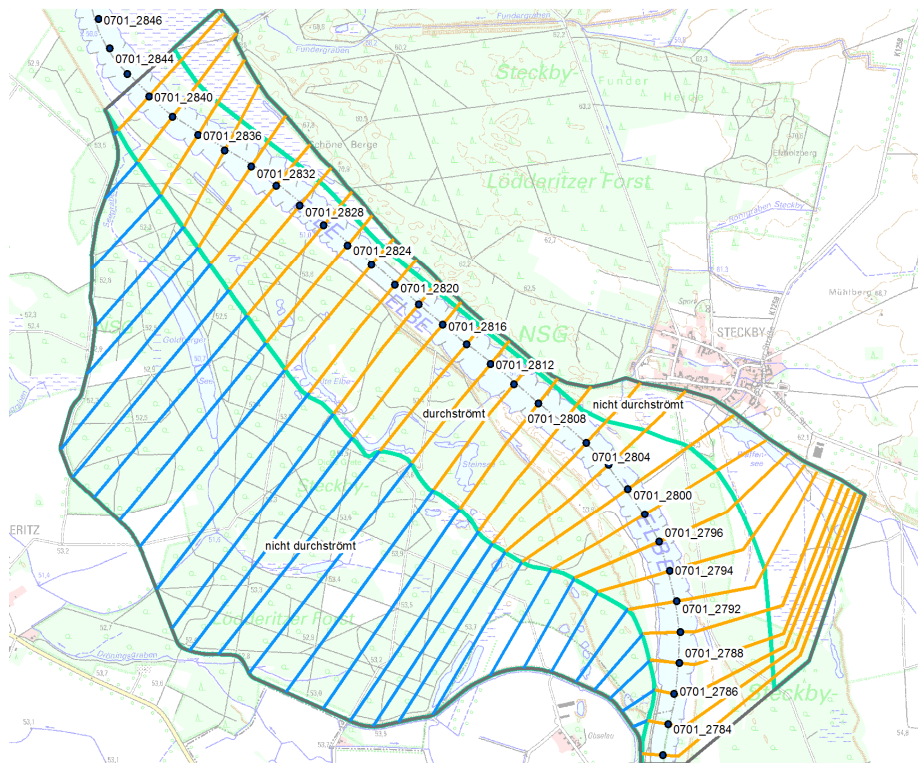


Abbildung 48: Verlängerte Querprofilspuren(blau) im Bereich der DRV Lödderitzer Forst sowie Darstellung des durchströmten und nicht-durchströmtem Bereichs, der Modellgrenze sowie der Profilknoten entlang der Gewässerachse (Hintergrundkarte: TK25)

### Deichrückverlegung Kletznick

Die Deichrückverlegung Kletznick wird über die 13 im Bereich der Maßnahme gelegenen Querprofile abgebildet, welche mit ArcSOBEK (Kapitel 3) neu erstellt wurden. Entsprechend den zuvor beschriebenen Maßnahmen wurden auch hier zunächst die betreffenden Querprofilspuren verlängert sowie Höhenpunkte im DGM (z. B. im Bereich der Deichschlitzungen) angepasst. Die gesamte Maßnahme Kletznick wird dem nicht durchströmten Bereich zugeschrieben.

### Austrassierung Fischbeck

Für die Anpassungen im Modell im Bereich der Ausstrassierungsstrecke Fischbeck ist besonders der Abschnitt zwischen Elbe-km 387,8 und Elbe-km 389,4 relevant. Hier wird, bis auf einen Wildrettungshügel, der Deich zurückverlegt, so dass neue wasserspeichernde Bereiche hinzukommen. Die Querprofilspuren wurden verlängert und z. T. abgelenkt, um ein Überschneiden und damit eine mehrfache Berücksichtigung der Volumina zu vermeiden. Das DGM wurde vor Ableitung der neuen Querprofile durch Löschen der Höhenpunkte im Bereich der Deichschlitze angepasst.

### Deichrückverlegung Sandau-Nord

Die Querprofile wurden im Bereich der Deichrückverlegung Sandau-Nord zwischen Elbe-km 417,6 und Elbe-km 420,6 auf Höhe des Vorlands vor dem ursprünglichen Deich entsprechend des neuen Deichverlaufs manuell verlängert. Dies betrifft ausschließlich den Retentionsbereich der Profile. Trotz der in Realität ausgeführten Schlitzungen des Altdeichs an definierten

Stellen wird vereinfacht von einer flächigen Füllung des geschaffenen Retentionsraums ausgegangen. Mitunter gilt es zu prüfen, ob im Zuge der NHWSP-Nachweisberechnungen eine detaillierte bzw. aktualisierte Schematisierung in Zukunft verfügbar wird. Der Bereich der zukünftigen Deichrückverlegung Sandau-Süd wird durch die aktuellen Querprofile erfasst. Sofern diese Maßnahme weiter voranschreitet, ist zu prüfen, ob bzw. welche (geringfügigen) Anpassungen in den SOBEK-Profilen erforderlich werden.

#### Deichrückverlegung Altjeßnitz

Die im Zuge der Aktualisierung der Mulde (siehe Kapitel 2.2.2.2) neu erstellten Querprofile decken den Bereich der Deichrückverlegung Altjeßnitz bereits vollständig ab. Mitunter sollte geprüft werden, ob z. B. im Zuge der NHWSP-Nachweisberechnungen eine detaillierte Schematisierung verfügbar wird. Die gewählte Schematisierung erscheint allerdings zum Zweck der Hochwasservorhersage als ausreichend genau.

#### Deichrückverlegung Priorau-Möst

Die bestehenden Querprofilspuren wurden bis zur neuen Modellgrenze verlängert. Sämtliche Höhenpunkte, die den Altdeich abbilden, wurden vor der Neuerstellung der sechs Mulde-Profile im Bereich der Deichrückverlegung Priorau-Möst entfernt.

#### Deichrückverlegung Dessau-Törten

Die bestehenden Querprofile decken den Bereich der Deichrückverlegung Törten bis zur neuen Modellgrenze bereits ab. Der Bereich der DRV ist allerdings als Sommerdeich (siehe Kapitel 3) berücksichtigt. Entsprechend werden lediglich die Deichhöhen im Bereich des Altdeichs auf Sohlniveau herabgesetzt.

Wenn auch sämtliche Maßnahmen für den Modellzustand 2018 bestmöglich implementiert wurden, ist zu bedenken, dass es sich bei dem vorliegenden Modellinstrumentarium um ein 1D-Modell handelt, welches nicht für die Belange des (lokalen) Nachweises einzelner Maßnahmen geeignet ist. Dennoch erscheinen die gewählten Techniken zur Berücksichtigung der hochwassermindernden Maßnahmen als geeignet, um ihren Effekt für die Vorhersagepegel hinreichend genau nachzuempfinden. Da viele Maßnahmen noch nicht ihren Endzustand erreicht haben, wird eine wichtige Aufgabe der Modellpflege in der Überprüfung und ggf. Aktualisierung oder Optimierung der Maßnahmenabbildung im Vorhersagemodell liegen.

## 7 Anpassungen des Vorhersagesystems WAVOS

Das Vorhersagesystem WAVOS, welches weiterhin in der Hochwasservorhersagezentrale Elbe beim LHW sowie im LHWZ Sachsen als Einzelplatzversion parallel zum serverbasierten System KALYPSO eingesetzt wird, wurde in den nachfolgend beschriebenen Funktionalitäten erweitert und angepasst, um auch mit dem aktuellen SOBEK-Vorhersagemodell interagieren zu können. Details zur Anwendung der einzelnen WAVOS-Funktionalitäten sind dem ebenfalls aktualisierten Anwenderhandbuch zu entnehmen (BfG 2018).

### 7.1 Parallele Nutzung von WAVOS-1D und SOBEK

WAVOS Elbe wurde dahingehend erweitert, dass die parallele Nutzung der Rechenkerne / Modellsysteme WAVOS-1D und SOBEK möglich ist. Der Anwender kann interaktiv wählen (Abbildung 49) und WAVOS regelt anschließend die Handhabung des einen oder anderen Modells.

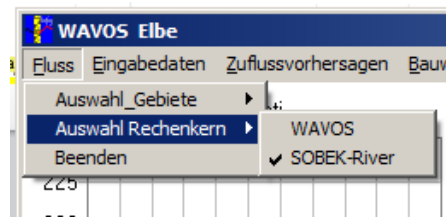


Abbildung 49: Auswahl des Rechenkerns / Berechnungsmodells in WAVOS

Für den Anwender hilfreich ist, dass beide Modelle den identischen WAVOS-Input-File nutzen, d.h. beide Modelle mit geringem Aufwand nacheinander gestartet und ihre Ergebnisse anschließend verglichen werden können, da die Ergebnisse beider Modelle getrennt vorgehalten werden. Das Ausgabeformat ist sowohl bei der Nutzung des WAVOS-1D – Modells wie auch des SOBEK-Modells identisch, was auch die Weiterverarbeitung der Ergebnisse vereinfacht.

### 7.2 Zuflussvorhersagen

WAVOS wurde entsprechend der aktuell verfügbaren Zuflussvorhersagen angepasst. Größtenteils konnte die Anpassung durch Konfiguration erfolgen (z. B. neue Zwischengebiete im sächsischen Abschnitt oder verlängerte Zuflussvorhersagen an der Saale). Für die Verarbeitung der neuen unteren Randbedingung am Pegel Zollenspieker (siehe Kapitel 2.2.1.3) wurde jedoch eine Anpassung in zweierlei Hinsicht erforderlich:

- Ein Konvertierungsskript wurde erstellt (geschrieben in der Software R), welches das BSH-spezifische Format in ein klassisches Zeitreihenformat für WAVOS konvertiert
- WAVOS wurde erweitert, um die nicht-äquidistanten, mitunter auf Minutenbasis definierten Vorhersagewerte verarbeiten zu können.

Abbildung 50 zeigt die Übersichtsdarstellung der Zuflussvorhersagen in WAVOS für den Parameter „Wasserstand“ (oben) und „Abfluss“. Erkennbar wird, dass für die Zwischengebiete (Abflussvorhersagen) und den Pegel Zollenspieker (Wasserstandsvorhersagen) keine W-Q-Umrechnung mittels Abflusstafel wie an den übrigen Flüssen möglich ist.

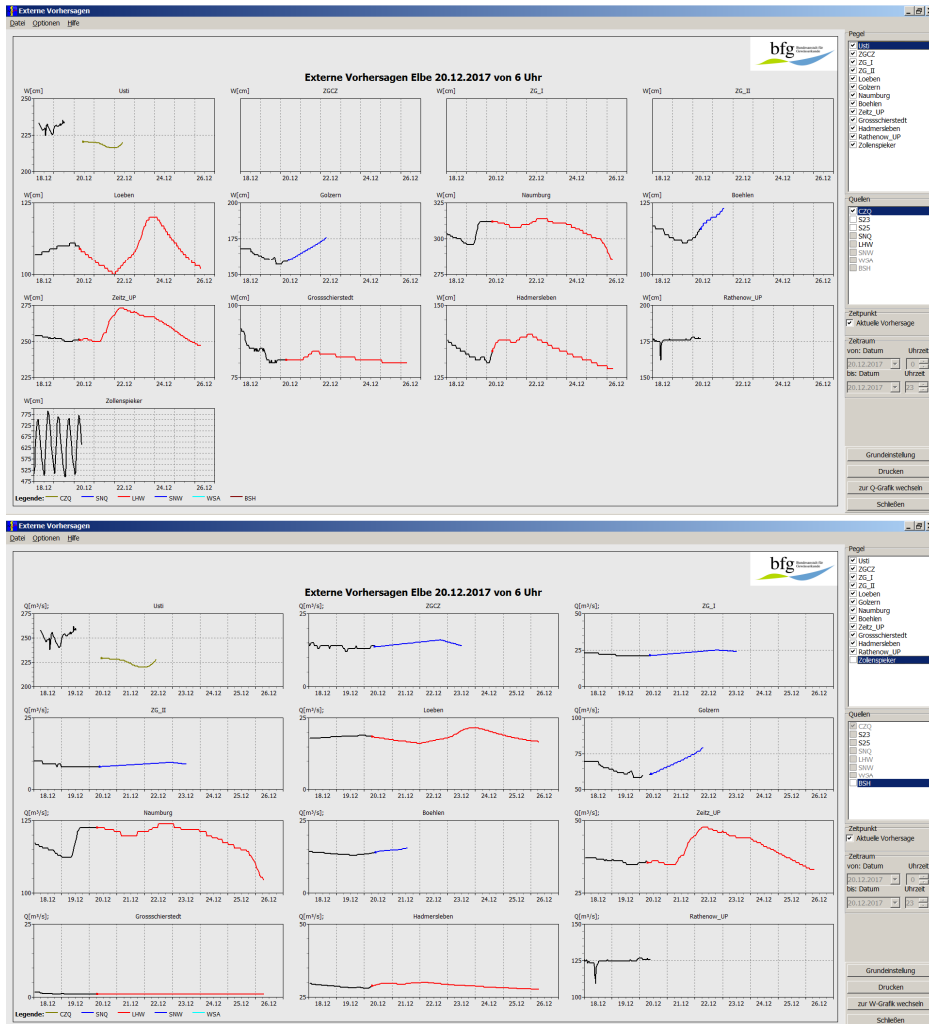


Abbildung 50: Allgemeine Darstellung der Zuflussvorhersagen in der WAVOS-Oberfläche; oben: Wasserstände, unten: Abflüsse

### 7.3 Bauwerke

Die WAVOS-Funktionalität zur Steuerung von Bauwerken wurde substantiell erweitert, um die besonderen Anforderungen an der Elbe zu erfüllen. Grundlegend wurde die Möglichkeit geschaffen sowohl die bauwerksrelevanten Steuerdateien des WAVOS-ID – Modells sowie die des SOBEK-Modells zu editieren. Für die Funktionalität im SOBEK-Modell kamen des Weiteren zwei grundlegend neue Funktionalitäten hinzu:

- Die Steuerung von Pumpen ist erforderlich, um die komplexe Steuerung im Bereich der Havelmündung bei Hochwasser im Zusammenspiel mit dem externen Kapungsmodell realisieren zu können (siehe Kapitel 2.4.3). Der Anwender kann nun via WAVOS vordefinierte Durchflussmengen an den beiden „künstlichen“ Pumpen am Neuerbener Wehr und am Durchstichwehr Quitzöbel vorgeben und damit den Zu-

fluss in die Havel sowie zurück in die Elbe (bei gleichzeitigem Schließen der Wehrbauwerke) explizit (unter Umgehung der hydrodynamischen Berechnung der Austauschmengen) vorgeben. Abbildung 51 zeigt die neue Dialogmaske in WAVOS zur Eingabe und visuellen Kontrolle von Pumpmengen.

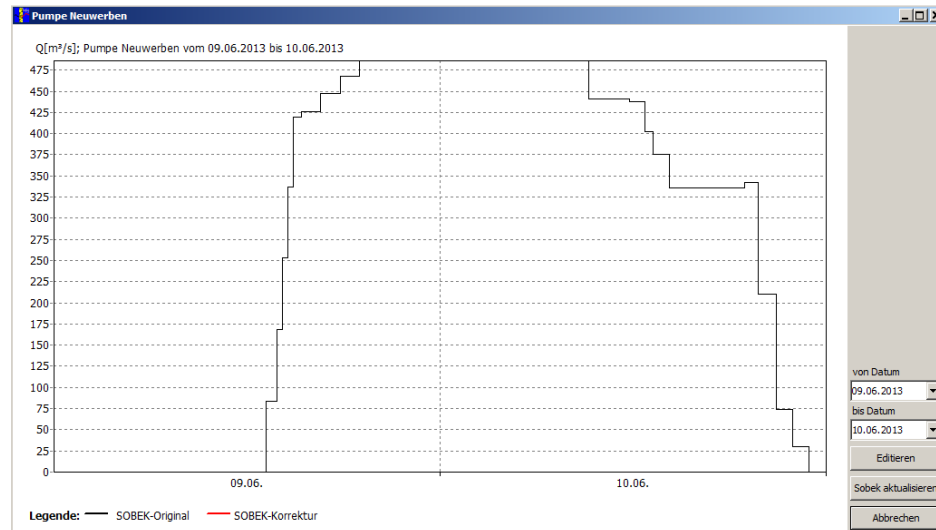


Abbildung 51: WAVOS-Dialogmaske für das Editieren der Pumpeneinstellungen

- Für den WAVOS-Anwender ist es möglich via WAVOS explizit die Höhe gesteuerter Bauwerke (z. B. Wehr Geesthacht oder Gnevsdorfer Wehr, siehe Kapitel 2.3.1.2 bzw. 2.4.3) vorzugeben und die implementierte automatische Steuerung zu deaktivieren. Einerseits ermöglicht es WAVOS, vergleichbar der Vorgabe von Pumpmengen mit grafischer Unterstützung (s.o.), die Bauwerkshöhen vorzugeben, darüber hinaus unterstützt WAVOS den Anwender bei der Handhabung der verschiedenen Regler, die zwecks automatischer und manueller Steuerung für dasselbe Bauwerk definiert sein müssen (vergleiche Abbildung 8). Hier gilt es auszuschließen, dass nicht zwei konkurrierende Regler (mit unterschiedlichen Steuerungsanweisungen) gleichzeitig auf ein Bauwerk zugreifen. Dies führt zum Modellabbruch.

Die Optionen vordefinierte Bauwerke zu öffnen und zu schließen (z. B. Pretziener Wehr) sowie die Möglichkeit potentielle Deichbruchstellen aktivieren / deaktivieren zu können, bestand bereits aus anderen WAVOS-Anwendungen und wurde lediglich für die Erfordernisse der Elbe konfiguriert.

Mit der erweiterten Bauwerksfunktionalität wurde versucht, den WAVOS-Anwender bei den umfangreichen und mitunter komplexen Steuerungsoptionen im SOBEK-Vorhersagemodel zu unterstützen. Dennoch bleiben die Anforderungen an den Anwender diesbezüglich hoch.

## 7.4 Interaktive Anpassung von Vorhersagen

Die manuelle Nachbearbeitung von Vorhersageergebnissen war bis dato auf Manipulation der Ergebnisdatei mittels eines Texteditors beschränkt. Insbesondere eine Korrektur im zeitlichen

Verlauf einer Hochwasserwelle ist damit sehr aufwändig und fehleranfällig, insbesondere für den Fall, dass dies an mehreren Pegeln im Gewässerverlauf als erforderlich erachtet wird. Vor diesem Hintergrund wurde die Option geschaffen, angelehnt an eine Funktionalität des früheren Vorhersagesystems ELBA (Fröhlich 1996), die Vorhersage interaktiv zeitlich (quasi horizontal) und in ihrer Höhe (quasi vertikal) zu verschieben. Zudem werden die Ganglinien der Messdaten, der Simulation und der unverschobenen Vorhersage für jeden Pegel darstellt (siehe Abbildung 52). Das vom Nutzer gewählte  $\Delta t$  und  $\Delta z$  wird pegelspezifisch abgespeichert, was einerseits der Reproduzierbarkeit und Dokumentation dient und es darüber hinaus ermöglicht für die nachfolgende Vorhersage einen ersten Vorschlag für die Verschiebung anzubieten.

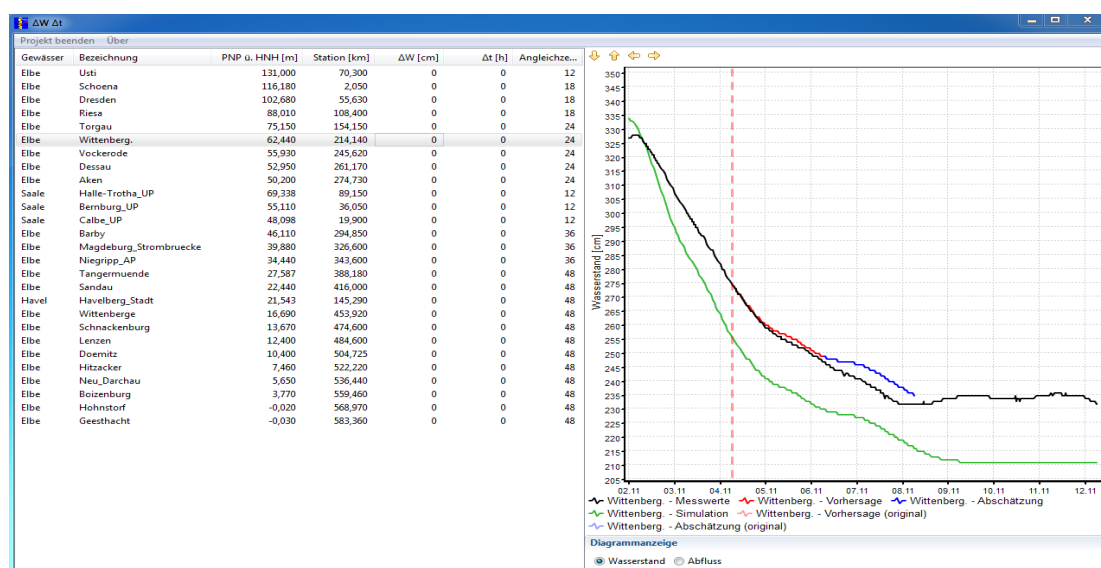


Abbildung 52: Anwendersicht auf das neu erstellte Werkzeug zur interaktiven Anpassung von Vorhersagen (Quelle: BCE 2018d).

Technisch wurde diese neue Funktionalität nicht innerhalb von WAVOS sondern in Form des externen Programms „dtdw“ realisiert (BCE 2018d). Veranlassung hierfür ist, dass der grafische Postprozessor damit sowohl in der Einzelplatzversion von WAVOS Elbe als auch im Prognosesystem Kalypso implementiert werden konnte. Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die für beide Vorhersagesysteme typischen Arbeitsabläufe erhalten bleiben und die Prozessierungsmethode für beide Systeme aus Anwendersicht möglichst identisch ausfällt. Weitere Details, insbesondere auch zu den verschiedenen Algorithmen zur Generierung plausibler Vorhersageverläufe auch nach einer Modifikation sind der separaten Programmdokumentation (BCE 2018c) zu entnehmen.

Als weitere Entwicklung, die im Kontext der Aktualisierung des Hochwasservorhersagemodells der Elbe durchgeführt wurde, betrifft die Erweiterung des Softwareprodukts ProFoUnD (Hydron 2016a). Wie bereits im Zwischenbericht dargestellt (BfG 2017), besteht nun auch die Möglichkeit mittels ProFoUnD Wasserstandsvorhersagen, die mit WAVOS-1D bzw. SOBEK innerhalb des Vorhersagesystems WAVOS erstellt wurden, umfangreich aus- und in Bezug zur Vorhersageunsicherheit zu bewerten.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Hochwasser 2013 an der Elbe hat, wie jedes Extremereignis, auch die zur Vorhersage eingesetzten Modelle und Systeme vor große Herausforderungen gestellt und konkrete Ansatzpunkte einer weiteren Verbesserung der Werkzeuge geliefert. Eine Erkenntnis bestand in der Erfordernis zur Aktualisierung und Optimierung des zur Hochwasservorhersage an der Elbe eingesetzten hydrodynamisch-numerischen Modells. Die umfassende Überarbeitung des Vorhersagemodells wurde im Auftrag der FGG Elbe zwischen 2015 und 2018 bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde, welche 2007 auch das bis dato eingesetzte HN-Modell erstellt hatte, durchgeführt. Parallel erfolgte eine Aktualisierung und Erweiterung der in der HVZ Elbe beim LHW Sachsen-Anhalt eingesetzten Vorhersagesysteme KALYPSO und WAVOS, wobei die BfG ausschließlich das letztere als Einzelplatzversion installierte System bearbeitet hat.

Die beteiligten Parteien haben sich zu einer sehr umfassenden Überarbeitung des Hochwasservorhersagemodells für die Elbe entschlossen, die nicht nur eine Aktualisierung der topografischen Verhältnisse und eine Nachkalibrierung der jüngeren extremen Hochwasser 2011 und 2013 umfasst, sondern auch die Aktualisierung der Modellsoftware, die Erweiterung der steuerbaren Bauwerke im Modell, die Ausdehnung des Modellgebiets sowie die explizite Berücksichtigung des Tideinflusses beinhaltet. Die folgende Auflistung stellt das aktualisierte Vorhersagemodell dem bis dato eingesetzten Modell in den wesentlichen Punkten gegenüber und stellt damit eine kompakte Zusammenfassung der Arbeiten der BfG dar.

- Modellsoftware SOBEK:  
Die Umstellung auf die Modellsoftware SOBEK macht das Modell technisch zukunftssicher (z. B. hinsichtlich der Aktualisierung von Betriebssystemen etc.). Darüber hinaus können zukünftige Arbeiten am Modell auch an Dritte (z. B. Ingenieurbüros) vergeben werden, da das Softwarepaket SOBEK etabliert und umfassend dokumentiert ist und es einen Markt an potentiellen Auftragnehmern, auch im deutschsprachigen Raum, gibt.
- Berücksichtigung Kappungsganglinien:  
In Ergänzung zur modellinternen Berücksichtigung der Havelsteuerung bei Niedrig- / Mittelwasser und kleineren Hochwasserereignissen besteht nun die technische Möglichkeit, die im Staubeirat abgestimmte Kappungsganglinie (Zufluss in die Havelniederung über das Wehr Neuwerben) und die anschließende Entlastung der Havel nach Durchgang der Elbehochwasserwelle über die Wehrgruppe Quitzöbel explizit dem Modell vorzugeben. Damit einher geht eine gestiegene Komplexität der Bauwerke und ihrer Steuerungsmöglichkeiten an der Havel, die vom geschulten Anwender in der Vorhersage beherrscht werden muss.
- Tideinfluss:  
Als untere Randbedingung kann nun am Pegel Zollenspieker der reale, tidebeeinflusste Wasserstand anstelle der bisher verwendeten, konstruierten Wasserstand-Abfluss-Beziehung angesetzt, werden. Damit ist eine realistischere Modellierung und

damit auch verbesserte Vorhersage des Tideeinflusses auf die Binnenelbe im Fall von Sturmfluten und/oder Binnenhochwassern möglich, wenn das Wehr Geesthacht gelegt wird. Auch diese Änderung stellt durch die gestiegene Modellkomplexität und den zusätzlichen Informationsfluss zum Anlagenbetreiber erhöhte Anforderungen an den Anwender in der operationellen Vorhersage.

- **Modelltopografie:**  
Die Modelltopografie wurde in ausgewählten Bereichen (Elbe im Bereich Magdeburg, Mulde, Saale) aktualisiert und um hochwasserrelevante Maßnahmen (z. B. Deichrückverlegung Lenzen) ergänzt.
- **Hochwasserschutzmaßnahmen:**  
Geplante oder bereits in der Umsetzung befindliche hochwassermindernde Maßnahmen (z. B. Polder Aussig, Polder Köttlitz, Deichrückverlegung Lödderitzer Forst etc.) wurden in das Modell implementiert. Soweit möglich fand eine Abstimmung mit dem NHWSP-Modellinstrumentarium, das sich ebenfalls bei der BfG im Aufbau befindet, statt. Damit konnte ein, den aktuellen Zustand repräsentierendes Modell für den operationellen Betrieb bereitgestellt werden.
- **Berücksichtigung von Zwischeneinzugsgebieten:**  
Der Zuschnitt der die kleineren Elbezuflüsse summarisch erfassenden Zwischengebiete im tschechisch-sächsischen Modellabschnitt wurde verfeinert (separate Erfassung der Zuflüsse zwischen Ústí nad Labem und Schöna).
- **Weitere Vorhersagepegel:**  
Vier weitere Vorhersagepegel (Pirna, Meißen, Mühlberg, Neuwerben EP) wurden ergänzt. Diese Pegel wurden in der Kalibrierung bereits berücksichtigt.
- **Schwarze Elster:**  
Die Schwarze Elster wird ab dem Pegel Löben nun explizit hydrodynamisch modelliert. Hierdurch kann die Wellenlaufzeit und –verformung bis zur Mündung in die Elbe verbessert berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden die Rückstauverhältnisse im Mündungsbereich unmittelbar vom Modell (mit den Mitteln der 1D-Technik) erfasst.
- **Potentielle Deichbruchstellen:**  
Vereinfachte (an den operationellen Betrieb angepasste) Berücksichtigung potentieller Deichbruchstellen ist möglich.
- **Modellkalibrierung:**  
Die Modellkalibrierung wurde auf Basis der jüngsten (Extrem-)hochwasser 2011 und 2013 aktualisiert und berücksichtigt nun auch Abfluss- / Wasserstandsbereiche, die bis dato unkalibriert waren. Die Güte der instationären Modellergebnisse hat sich weitreichend verbessert. Dies betrifft insbesondere das beim Hochwasser 2013 identifizierte Problem der Wellenlaufzeiten, die deutlich vom Modell unterschätzt wurden.

Auch in Bezug auf das Vorhersagesystem WAVOS gab es substantielle Verbesserungen gegenüber dem bisherigen Zustand:

- Die Möglichkeiten zur Steuerung von Bauwerken wurden umfassend erweitert, was auch die Übersteuerung automatisch im Modell implementierter Steuerungsregeln sowie die Implementierung der Kappungsganglinie im Bereich der Havel betrifft.



- Die Ergebnisse des SOBEK-Vorhersagemodells können – in Anlehnung an die frühere Funktionalität im Vorhersagemodell ELBA (Fröhlich 1996) – interaktiv mit grafischer Unterstützung nachträglich modifiziert werden. Der Anwender kann sowohl zeitlich (horizontal) sowie auch in der Höhe (vertikal) an jedem Vorhersagepegel die Vorhersagen nachbearbeiten und wird explizit bei der Plausibilisierung der Ergebnisse im Gewässerverlauf unterstützt.
- Neben den aktualisierten Zuflussvorhersagen im Bereich Sachsens und Sachsen-Anhalts können die MOS-Vorhersagen des BSH (Müller-Navarra & Knüpfner 2010) für den Pegel Zollenspieker im Vorhersagesystem visualisiert und in den Modellberechnungen unmittelbar genutzt werden.

Die durchgeführten Arbeiten am Hochwasservorhersagemodell, einschließlich der (z. T. noch laufenden) Arbeiten an den Vorhersagesystemen stellt für die Hochwasservorhersage an der Elbe einen wichtigen Schritt dar. Insbesondere das zweistufige Vorgehen, bei dem in einem ersten Arbeitsschritt ein verbessertes, dem zeitlichen Zustand der Kalibrierereignisse (~ 2006-2013) entsprechendes Modell erstellt und kalibriert / validiert wurde, hat sich als zielführend erwiesen. In einem zweiten Schritt wurde das final kalibrierte Modell durch den Einbau aller relevanten, seit 2013 umgesetzten (oder sich in der Umsetzung befindlichen) Maßnahmen des Hochwasserschutzes (Polder, Deichrückverlegungen) in den aktuellen Zustand überführt. Dieser „Modellzustand 2018“ wird nach einer Übergangs- und Testphase zukünftig für die operationelle Hochwasservorhersage der Elbe eingesetzt werden. Vor dem Hintergrund der weiteren geplanten Maßnahmen des Hochwasserschutzes entlang der Elbe und ihren wichtigsten Nebenflüssen ist das Modell im „Zustand 2018“ über die kommenden Jahre sukzessive fortzuschreiben, um jeweils den aktuellen Zustand für die Vorhersage abbilden zu können. Nach Abschluss der in diesem Bericht dokumentierten Arbeiten liegt zum einen ein aktualisiertes und in vielen Bereichen verbessertes Vorhersagemodell einsatzbereit vor. Zum anderen wird mit dem Wechsel der Modellsoftware die Möglichkeit eröffnet, das Modell flexibel zu pflegen und auch fachlich weiterzuentwickeln, was eine Daueraufgabe darstellt.

## Literaturverzeichnis

- ARGE SOBEK-Elbe (2009): Erstellung des eindimensionalen Feststofftransportmodells für die Elbe, ARGE aus Björnsen Beratende Ingenieure GmbH und Deltares im Auftrag der BfG, Koblenz. 2009.
- BCE (2017): Unterlagen zum Workshop ArcSobek am 09.02.2017 in der BfG (unveröffentlicht), Koblenz, Februar 2017.
- BCE (2018a): Kalypso - Anwenderhandbuch (Installation Hochwasservorhersagezentrale Sachsen-Anhalt), Stand: 31.01.2018.
- BCE (2018b): Kalypso - Technische Dokumentation (Installation Hochwasservorhersagezentrale Sachsen-Anhalt), Stand: 16.04.2018.
- BCE (2018c): Weblink: <https://www.bjoernsen.de/index.php?id=kalypsoforecast> (zuletzt abgerufen am 29.06.2018)
- BCE (2018d):  $\Delta t / \Delta W$  – Vorhersageanpassung Elbe – Dokumentation. Stand: März 2018.
- BfG (2005): Digitales Geländemodell des Wasserlaufes – Elbe-Mitte (mit Havel / km 103,0 bis 156,8). Koblenz, 2005.
- BfG (2008): Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS - Modellbeschreibung und Benutzerhandbuch WAVOS Elbe, Koblenz.
- BfG (2011a): DGM-W Tide- und Außenelbe“, im Auftrag des WSA HH und WSA CUX, Auftragsabwicklung BfG. Koblenz, Sept. 2011.
- BfG (2011b): Ermittlung des Einflusses der Flutung der Havelniederung auf Hochwasser an der Elbe im Bereich des HQ100. BfG-Bericht 1726, Koblenz.
- BfG (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse. BfG-Mitteilungen Nr. 31, Koblenz, DOI: 10.5675/BfG\_Mitteilungen\_31.2014.
- BfG (2017): WAVOS Elbe, Verbesserung der HW-Vorhersage. Zwischenbericht, BfG-1917, Koblenz, DOI: 10.5675/BfG-1917.
- BfG (2018): Das Sobek-Modell zur Hochwasservorhersage an der Elbe und seine Kopplung mit WAVOS Elbe - Handbuch zur praktischen Anwendung im Vorhersagebetrieb sowie zu fachlich – technischen Grundlagen. Koblenz, Stand: Juni 2018.

Burek, P. & Rademacher, S. (2007): Operationelle Hochwasservorhersage für die Elbe mit dem Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS. In: Fünf Jahre nach der Flut. Hochwasserschutzkonzepte - Planung, Berechnung, Realisierung. Dresdner Wasserbaukolloquium 2007. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 35. Technische Universität Dresden. Dresden. S. 25-34.

Burek, Peter, Rademacher, Silke, Schikowski, Gerhard (2008): Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS - Modellbeschreibung und Benutzerhandbuch WAVOS ELBE. Koblenz.

Deltares (2016): SOBEK, Hydrodynamics, Rainfall Runoff and Real Time Control, User Manual, Suitable for SOBEK 2.15. Deltares, Delft (Niederlande), 2016.

Fröhlich, W. (1996). ELBA ein Programmsystem für die Wasserstandsvorhersage. Aus: Gewässer-Informationssysteme: Datenmanagement und Modellierung von Stromlandschaften ; Tagungsband zum Vorseminar vor dem 7. Magdeburger Gewässerschutzseminar, 20. Oktober bis 22. Oktober 1996 in Budweis.- 1996. - S. 150-153.

HYDRON (2016): ProFoUnD Programmbeschreibung und Anwendungshinweise - Stand 19.04.2016 (Revision 7.2), im Auftrag von WWA Kempten, Bayer. Landesamt für Umwelt, LUWG Rheinland-Pfalz, Hess. Landesamt für Umwelt und Geologie, Karlsruhe.

IWUD (2015): Studie zur Überprüfung der Zu- und Abflussverhältnisse in der Tangerniederung im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt, Hötter, Nov. 2015.

LHW Sachsen-Anhalt (2011): Hydraulische Modellierung der Schwarzen Elster in Sachsen-Anhalt, erstellt durch Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH. Magdeburg. 2011.

LHW Sachsen-Anhalt (2013): Erweiterung Mulde-Modell bis ans Hochufer, Mulde vom Muldestausee bis Mündung, erstellt durch Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH. Magdeburg. 2013.

LHW Sachsen-Anhalt (2014a): Erarbeitung fachlicher Grundlagen für die Umsetzung der EG-HWRM-RL für die Saale von der Mündung (km 0+000) bis km 71+000, Erstellung eines hydraulischen 2D-Modells, erstellt durch Planungsgesellschaft Schloz+Lewis mbH. Magdeburg. 2014.

LHW Sachsen-Anhalt (2014b): Szenarienberechnungen mittels hydraulischer 2D-Modellierung an der Saale von km 68+000) bis km 166+500, erstellt durch Planungsgesellschaft Schloz+Lewis mbH. Magdeburg, 2014.

LHW Sachsen-Anhalt (2014c): Verwaltungsvorschrift zur Durchführung des Hochwassermelddienstes (Hochwassermeldeordnung – HWMO), RdErl. Des MLU vom 2014-22-2-62180/21, Anhang 1 zur Anlage 2: Schema des Gewässernetzes, veröffentlicht im Ministerialblatt für das Land Sachsen-Anhalt. Magdeburg, Dezember 2014.

LHW Sachsen-Anhalt (2015a): 2D-Modell der Mulde, Mündung Elbe bis Muldestausee, Aktualisierung des Gewässerschlauches, erstellt durch Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH. Magdeburg. 2015.

MLUL/LfU Brandenburg (2014): Hochwassergefahren – und Risikokarten für Hochwasser im Land Brandenburg. Umweltdatenkatalog Brandenburg (WebOffice-Angebot).

Müller-Navarra, S. & Knüpfner, K. (2010): Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS). Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie Nr. 47/2010, Hamburg.

NLWKN (2011). Vorläufiger Betriebsplan für den Betrieb des Sielbauwerks und des Schöpfwerkes in Hitzacker (Elbe). NLWKN Betriebsstelle Lüneburg im Auftrag des Jeetzeldeichverbandes, Lüchow, Lüneburg.

Rademacher., Burek P. & Eberle, M. (2004): Niedrigwasser – Vorhersage an Bundeswasserstraßen – Entwicklung und operationeller Betrieb. In: Kleeberg, H.-B. und Koehler, G. (Hrsg.): Niedrigwassermanagement – Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz, Hydrologische Wissenschaften – Fachgemeinschaft der ATV-DVWK.

Steinebach, G. (1999): Using hydrodynamic models in forecast systems for large rivers. Proc. Advances in Hydro-Science and –Engineering, Vol. 3. Holz, K.P., Bechteler, W., Wang, S.S.Y., Kawahara, M. (ed.), Cottbus.

Stelling, G. S. & Duinmeijer, S. P. A. (2003): A staggered conservative scheme for every froude number in rapidly varied shallow water flows. International Journal Numerical Methods In Fluids 43: 1329–1354.

WSA Brandenburg (2017): Staubeiratssitzung 2016/2017, Heft Nr. 22, WSA Brandenburg, April 2017.