TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Dr.-Ing. Torsten Heyer
Dipl.-Ing. Paolo Dapoz
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

FORSCHUNGSBERICHT 2014/03

„ERARBEITUNG DER FACHLICHEN GRUNDLAGEN ZUR UMSETZUNG DER HOCHWASSERRISIKOMANAGEMENT-RICHTLINIE (EG-HWRM-RL) FÜR DIE ELBE VON KM 294,8 BIS KM 338,5 –SZENARIENBERECHNUNGEN“

Dresden, September 2014

Adresse:

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
01062 Dresden

Telefon: +49-(0)351 463 34397
Fax: +49-(0)351 463 37120
E-Mail: iwd@tu-dresden.de
WWW: www.iwd.tu-dresden.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Auftraggeber:	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt Otto-von-Guericke-Str. 5 39104 Magdeburg
Auftragnehmer:	Technische Universität Dresden Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) 01062 Dresden
Projektleiter:	Dr.-Ing. Torsten Heyer
Bearbeiter:	Dr.-Ing. Torsten Heyer Dipl.-Ing. Paolo Dapoz
Datum:	September 2014

.....

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stamm

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis ..... **I**
Abbildungsverzeichnis ..... **III**
Tabellenverzeichnis ..... **V**
Abkürzungsverzeichnis ..... **VII**
Symbolverzeichnis ..... **IX**
1 Veranlassung und Zielstellung **1**
2 Grundlagen **3**
2.1 Geodätische Referenzsysteme 3
2.2 Ausgangsmodell 3
2.3 Randbedingungen 5
2.3.1 Obere Randbedingungen 5
2.3.2 Untere Randbedingung 5
3 Varianten und Szenarien **7**
3.1 Szenario 0 - Referenz 7
3.2 Szenario 1 – Bewuchsreduzierung Elbe-Umflutkanal 9
3.2.1 Entfernung ausgewählter Bewuchsbereiche im EUK (SZ1T) 9
3.2.2 Globale Anpassung des Widerstandsbeiwerts im EUK (SZ130) 10
3.3 Szenario 2 –Öffnungszeitpunkt Pretziener Wehr 11
3.4 Szenario 3 - Bewuchsreduzierung Alte Elbe 12
3.4.1 Bewuchsentfernung im Bereich Alte Elbe in Magdeburg (SZ3) 12
3.4.2 Bewuchsentfernung im Bereich Alte Elbe in Magdeburg mit Sedimentabtrag (SZ3S) 13
3.5 Szenario 4 – Einfluss Cracauer Wehr 15
3.5.1 Rückbau des Cracauer Wehrs (SZ4) 15
3.5.2 Entfernung des Cracauer Wehres und Sedimentabtrag im Bereich Alte Elbe (außer „Kleiner Wasserfall“) (SZ4S) 15
3.5.3 Entfernung des Cracauer Wehres und Sedimentabtrag im Bereich Alte Elbe sowie Abtrag „Kleiner Wasserfall“ (SZ4SF) 17
3.6 Szenario 5 – Rückbau Kanonenbahnbrücken 18
3.7 Szenario 6 - MQ 20
3.8 Szenario 7 - Maximalvariante 20
4 Ergebnisse **21**
4.1 Auswertungsmethodik 21
4.1.1 Vergleich der Abflussaufteilungen 21
4.1.2 Wasserspiegeldifferenzen für den gesamten Modellbereich 21
4.1.3 Wasserspiegellagen in Gewässerlängsprofilen 21
4.2 Szenario SZ1T und SZ130 22
4.2.1 Abflussaufteilung 22
4.2.2 Wasserspiegeldifferenzen 22

4.2.3 Wasserspiegellängsprofile ... 23
4.3 Szenario 2 ... 25
4.3.1 Abflussaufteilung ... 25
4.4 Szenario 3 und 3S ... 26
4.4.1 Abflussaufteilung ... 26
4.4.2 Wasserspiegeldifferenzen ... 26
4.4.3 Wasserspiegellängsprofile ... 27
4.5 Szenario 4, 4S und 4SF ... 29
4.5.1 Abflussaufteilung ... 29
4.5.2 Wasserspiegeldifferenzen ... 30
4.5.3 Wasserspiegellängsprofile ... 30
4.6 Szenario 5 ... 33
4.6.1 Abflussaufteilung ... 33
4.6.2 Wasserspiegeldifferenzen ... 33
4.6.3 Wasserspiegellängsprofile ... 34
4.7 Szenario 6 ... 37
4.7.1 Abflussaufteilung ... 37
4.7.2 Wasserspiegellängsprofil ... 37
4.8 Szenario 7 ... 39
4.8.1 Abflussaufteilung ... 39
4.8.2 Wasserspiegeldifferenzen ... 40
4.8.3 Wasserspiegellängsprofile ... 40
5 Zusammenfassung und Ausblick ... 43
6 Quellen ... 47

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1 – Grenzen des 2D-HN-Modells zwischen Elbe-km 293,5 und 339,1. 4
Abbildung 2-2 – 2D-HN-Modell, Oberflächendefinitionen und zugehörige Fließwiderstandsbeiwerte, Kalibrierungszustand (STAMM ET AL., 2014) 4
Abbildung 3-1 – Ausdehnung der Bewuchsbereiche (links) und bewuchsbedingte Verklausungserscheinungen (rechts) im Bereich Haberlandbrücke (Quelle: KÜLLIG, 2014). 7
Abbildung 3-2 –Materialdefinitionen für den Referenzzustand (Szenario 0); inkl. neuem Oberflächentyp „14_Bewuchs_Bereich_Haberlandbrücke_rau“ (mit k_{St} = 5 $m^{1/3}$/s) 7
Abbildung 3-3 – Wasserspiegellängsprofile Elbe-Umflutkanal - Vergleich der gemessenen (HW 2013) und berechneten (Simulation: Q=5090 m³/s, stationär) Werte am linken Umflutdeich .. 8
Abbildung 3-4 – Vergleich der Oberflächentypen im EUK für den Referenzzustand (Mitte) und für das Szenario SZ1T (rechts) mit teilweiser Entfernung von Mittel- und Großbewuchs in ausgewählten Bereichen (rote Markierungen) im EUK 10
Abbildung 3-5 – Oberflächentypen für den Referenzzustand SZ0 und das Szenario SZ130 mit Oberflächentyp „12_EUK_global“ mit k_{St} = 30 $m^{1/3}$/s (mit Ausnahme bebauter Flächen) 11
Abbildung 3-6 – Simulierte Abflussganglinien im Bereich des Elbe-Umflutkanals (Szearien 2_1-1 und 2_1-2; HW-Ganglinie 2013, Q_{max} = 5090 m³/s, instationär).....12
Abbildung 3-7 – Oberflächentypen für den Referenzzustand SZ0 (links) und das Szenario SZ3 (rechts) mit einheitlichem Oberflächentyp „03_Fließgewässer“ (k_{St} = 30 $m^{1/3}$/s) im Bereich der Alten Elbe im Stadtgebiet Magdeburgs 13
Abbildung 3-8 – Vergleich zwischen bestehender und modifizierter Sohle im Bereich der Alten Elbe (blau: Sohllage für SZ3S und SZ4S; lila: Sohllage für SZ4SF) 14
Abbildung 3-9 – Geländehöhen [müNHN] für den Modellbereich Alte Elbe im Referenzzustand SZ0 (links) und im Szenario SZ3S (rechts).....14
Abbildung 3-10 – Geländehöhen [müNHN] für den Modellbereich Alte Elbe im Szenario SZ4 (links) und Detaildarstellung im Bereich des Cracauer Wehrs für den Referenzzustand SZ0 (rechts, oben) und das Szenario SZ4 (rechts, unten).....15
Abbildung 3-11 – Geländehöhen [müNHN] für den Modellbereich Alte Elbe im Referenzzustand SZ0 (links) und im Szenario SZ4S (rechts).....16
Abbildung 3-12 – Oberflächentypen im Referenzzustand SZ0 (links), im Szenario 3/3S (Mitte) und in den Szenarien SZ4S/SZ4SF (rechts, mit Oberflächentyp „13_Bereich_Sedimententnahme_Alte_Elbe“ (mit k_{St} = 30 $m^{1/3}$/s) in Abtragsbereichen der Alten Elbe) 16
Abbildung 3-13 – Geländehöhen [müNHN] für den Modellbereich Alte Elbe im Referenzzustand SZ0 (links), im Szenario SZ4S (Mitte) und im Szenario SZ4SF (rechts).....17
Abbildung 3-14 – Lage der Kanonenbahn-Brücken im Untersuchungsgebiet 18
Abbildung 3-15 – Vergleich des Referenzzustands SZ0 und des Szenarios SZ5 im Bereich der Kanonenbahn in der Alten Elbe (oben – Geländehöhen, unten-Oberflächentypen) 19
Abbildung 3-16 – Vergleich des Referenzzustands SZ0 und des Szenarios SZ5 im Bereich der Kanonenbahn im Elbe-Umflutkanal (oben - Geländehöhen, unten - Oberflächentypen).19
Abbildung 3-17 – Übersicht der Modifikationen innerhalb des Szenarios SZ7 (Maximalvariante) bezüglich des Referenzzustands SZ0 20
Abbildung 4-1 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) der Szenarien SZ1T (links) und SZ130 (rechts) mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk).....23
Abbildung 4-2 – Wasserspiegellängsprofile EUK (Q=5090 m³/s, stationär; SZ0, SZ1T, SZ130).....24
Abbildung 4-3 – Wasserspiegellängsprofile Alte Elbe (Q=5090 m³/s, stationär; SZ0, SZ1T, SZ130) 25
Abbildung 4-4 – Wasserspiegellängsprofile Stromelbe (Q=5090 m³/s, stationär; SZ0, SZ1T, SZ130) ..25
Abbildung 4-5 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) der Szenarien SZ3 (links) und SZ3S (rechts) mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk).....27

Abbildung 4-6 – Wasserspiegellängsprofil EUK (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ3 und SZ3S).....28
Abbildung 4-7 – Wasserspiegellängsprofil Alte Elbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ3 und SZ3S).....28
Abbildung 4-8 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ3 und SZ3S).....29
Abbildung 4-9 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) der Szenarien SZ4S (links) und SZ4SF (rechts) mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk).....30
Abbildung 4-10 – Wasserspiegellängsprofil EUK (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ4, SZ4S und SZ4SF).....31
Abbildung 4-11 – Wasserspiegellängsprofil Alte Elbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ4, SZ4S und SZ4SF) 32
Abbildung 4-12 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ4, SZ4S und SZ4SF) 32
Abbildung 4-13 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) im Szenario SZ5 (links) mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk).....34
Abbildung 4-14 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) im Szenario SZ5 (links) im unmittelbaren Brückenbereich in der Alten Elbe (links) und im EUK (rechts) (rot – Anhebung, blau – Absunk) 34
Abbildung 4-15 – Wasserspiegellängsprofil EUK (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ5).....35
Abbildung 4-16 – Wasserspiegellängsprofil Alte Elbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ5).....36
Abbildung 4-17 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ5) 36
Abbildung 4-18 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=554 m³/s, stationär, SZ6).....38
Abbildung 4-19 –Fließtiefendarstellung aus der MQ-Simulation des SZ6 (Q=554 m³/s) 39
Abbildung 4-20 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) im Szenario SZ7 mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk).....40
Abbildung 4-21 – Wasserspiegellängsprofil EUK (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ7).....41
Abbildung 4-22 – Wasserspiegellängsprofil Alte Elbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ7).....42
Abbildung 4-23 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ7) 42
Abbildung 5-1 – Abflussaufteilung in den untersuchten HW-Szenarien (stationär) 45

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1 – Oberflächendefinition und Fließwiderstandsbeiwerte im Referenzzustand (Szenario 0) .. 8
Tabelle 3-2 – Abflussaufteilung in Messungen, im kalibrierten Modell und im Referenzzustand (SZ0) . 9
Tabelle 3-3 – Charakteristiken der realen und fiktiven Öffnung des Pretziener Wehrs beim HW2013 . 11
Tabelle 3-4 – modellierte Sedimentbewegungen in den Szenarien SZ3S, SZ4S und SZ4SF 17
Tabelle 4-1 – Vergleich der Abflussaufteilung in Messungen und in Szenarien SZ1T bzw. SZ130 22
Tabelle 4-2 – Vergleich der Abflussaufteilung in Messungen und in Szenarien SZ2_1-1 bzw. SZ2_1-2 25
Tabelle 4-3 –Abflussaufteilung in Messungen und in Szenario SZ3 bzw. SZ3S 26
Tabelle 4-4 –Abflussaufteilung in Messungen und in Szenario SZ4, SZ4S und SZ4SF 29
Tabelle 4-5 – Vergleich der Abflussaufteilung in Messungen und in Szenarien SZ0 bzw. SZ5 33
Tabelle 4-6 –Abflussaufteilung in Messungen und in Szenario SZ6 37
Tabelle 4-7 – Vergleich der Abflussaufteilung in Messungen und in Szenarien SZ0 bzw. SZ7 39

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Neben den gebräuchlichen Abkürzungen werden weiterhin vereinbart:

Abkürzung	**Bedeutung**
AG	Auftraggeber
2D-HN-Modell	zweidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
Elbe-km	Elbe-Kilometer
EUK	Elbe-Umflutkanal
EU-HWRM-RL	Hochwasserrisikomanagementrichtlinie
FB	Flussbereich
GIS	Geografisches Informationssystem
HS	Höhensystem
HW	Hochwasser, Hochwasserereignis
IWD	Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft, Sachsen-Anhalt
MD	Magdeburg
SZ	Szenario
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Bezeichnung
k_{St}	[$m^{1/3}$/s]	Strickler-Beiwert, Fließwiderstandsbeiwert
Q	[m³/s]	Abfluss, Durchfluss
WSP	[müNHN], [müPN]	Wasserspiegelhöhe (absolut, relativ)
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit (tiefengemittelt)
Δv	[m/s]; [cm/s]	Fließgeschwindigkeitsdifferenz
ΔW, WDiff	[m]; [cm]	Wasserspiegeldifferenz

Nicht angeführte Symbole oder abweichende Bedeutungen werden an den entsprechenden Stellen im Text erläutert.

1 VERANLASSUNG UND ZIELSTELLUNG

Das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden (IWD) wurde im Mai 2014 durch den Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW, im Folgenden auch AG) beauftragt, mit dem bereits bestehenden zweidimensionalen, hydrodynamisch-numerischen Oberflächenabflussmodell (2D-HN-Modell) der Elbe bei Magdeburg (inkl. Elbe-Umflutkanal) im Untersuchungsgebiet zwischen Elbe-km 294,8 - 338,5 (gesamte Modellausdehnung: Elbe-km 293,5 - 339,1) Szenarienuntersuchungen durchzuführen, um mögliche Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzniveaus in diesem Gebiet auf deren Potenzial und Wirksamkeit zu prüfen.

Anlässlich einer Ergebnispräsentation des Vorgängerprojekts (STAMM ET AL., 2014; Kalibrierung des 2D-HN-Modells auf HW2013) wurden am 06.03.2014 unter Beteiligung des LHW, der WSV, Vertretern der Stadt Magdeburg und weiteren Interessenträgern im Rahmen einer Projektberatung beim LHW in Magdeburg folgende zu untersuchenden Schwerpunkte („Szenarien“) formuliert:

- Bewuchseinfluss im Bereich des Elbe-Umflutkanals (EUK),
- Einfluss des Öffnungszeitpunktes des Preziener Wehres,
- Bewuchseinfluss im Bereich der Alten Elbe im Stadtgebiet Magdeburgs (mit und ohne Sedimentabtrag),
- Einfluss Cracauer Wehr (mit und ohne Sedimentabtrag),
- Einfluss der Kanonenbahnbrücken,
- Simulation von Mittelwasserverhältnissen.

Anhand der Ergebnisse dieser zunächst separat zu untersuchenden Maßnahmen war in Abstimmung mit dem AG eine Maximalvariante, welche die effektivsten dieser Maßnahmen zusammenfasst, zu entwickeln. Über den Vergleich der Wasserspiegellagen, die während des Hochwassers 2013 auftraten bzw. sich aus den HW-Simulationen ergaben, war die Wirksamkeit aller Szenarien zu ermitteln und darzustellen.

Der vorliegende Kurzbericht fasst die Bearbeitungsmethodik sowie die wesentlichen Erkenntnisse der Szenarienbetrachtungen zusammen. Die wichtigsten Ergebnisse der Simulationen werden innerhalb des Berichts in kompakter Form dargestellt. Darüber hinaus wurden dem AG vertragsgemäß die kompletten Simulationsdateien und Berechnungsergebnisse in den vereinbarten Datenformaten und -umfängen übergeben.

2 GRUNDLAGEN

Im Folgenden wird vorrangig auf die Daten eingegangen, welche im Rahmen der Szenarienerstellung verwendet wurden. Die Datengrundlage und die Vorgehensweise der ursprünglichen Modellerstellung und -kalibrierung werden in STZ (2012) und in STAMM ET AL. (2014) ausführlicher erläutert.

2.1 GEODÄTISCHE REFERENZSYSTEME

Das im Rahmen des Projekts verwendete geografische Informationssystem (GIS) sowie sämtliche Berechnungsergebnisse beziehen sich auf folgende Referenzsysteme, die den im Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft verwendeten Höhen- und Lagebezugssystemen entsprechen:

Höhenbezugssystem:

- Deutsches Haupthöhennetz 1992; DHHN 92, HS 160
- Normalhöhen
- Angaben in Meter über Normalhöhennull (m ü. NHN)
- Ausgleichung 1992
- Amsterdamer Pegel

Lagebezugssystem (LHW):

- Lagestatus 110 (LS 110)
- Gauß-Krüger-Koordinaten
- 3-Grad-Meridianstreifensystem
- Bessel-Ellipsoid
- Datum Potsdam

2.2 AUSGANGSMODELL

Ausgangsmodell des Forschungsprojektes war das 2D-HN-Modell, das im Rahmen des Vorgängerprojekts „Modellerweiterung und WSP-Modellierung zum Hochwasser 2013 entlang der Elbe vom Pegel Barby bis zur BAB 2 (Stadtstrecke Magdeburg)“ (vgl. STAMM ET AL., 2014) erweitert und auf die Verhältnisse des Hochwassers 2013 angepasst worden ist.

Das 2D-HN-Modell wurde auf Grundlage der Software SMS (Surface Water Modeling System) erstellt. Die Abflusssimulationen erfolgten mittels der Software HYDRO_AS-2D. Das Berechnungsnetz besteht aus 3.622.565 Elementen mit 1.888.771 Knoten und bildet ca. 108 km² des Flussgebiets der Elbe bei Magdeburg (inkl. Elbe-Umflutkanal) ab (siehe Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2).

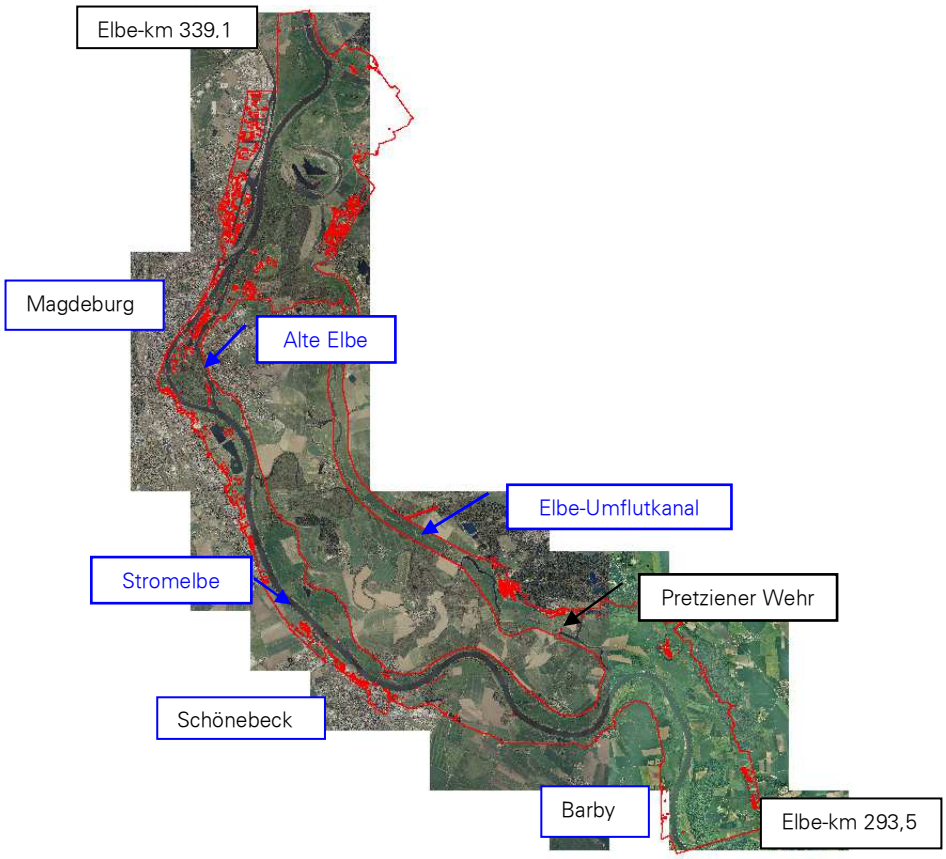
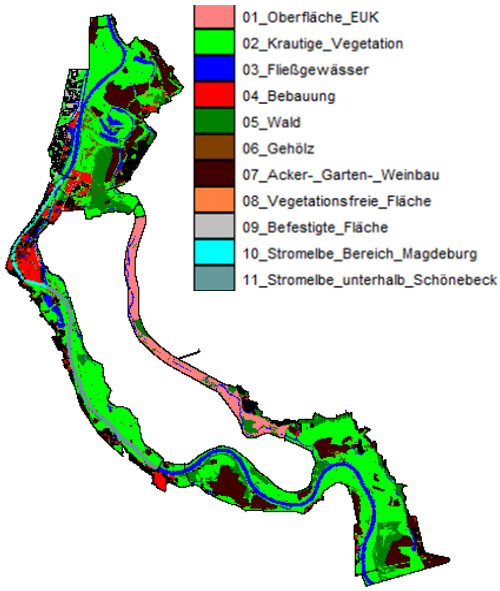


Abbildung 2-1 – Grenzen des 2D-HN-Modells zwischen Elbe-km 293,5 und 339,1.



Mat.-Nr.	Oberflächentyp	k_{St} [$m^{1/3}/s$]
0	Disable (inaktiv)	-
1	01_Oberfläche EUK	25
2	02_Krautige Vegetation	18
3	03_Fließgewässer	30
4	04_Bebauung	25
5	05_Wald	10
6	06_Gehölz	10
7	07_Acker-, Garten- und Weinbau	25
8	08_Vegetationsfreie Fläche	20
9	09_Befestigte Fläche	40
10	10_Stromelbe Bereich Magdeburg	38
11	11_Stromelbe unterhalb Schönebeck	38

Abbildung 2-2 – 2D-HN-Modell, Oberflächendefinitionen und zugehörige Fließwiderstandsbeiwerte, Kalibrierungszustand (STAMM ET AL., 2014)

2.3 RANDBEDINGUNGEN

2.3.1 Obere Randbedingungen

Als obere Randbedingung wurde in allen Simulationen ein Zufluss auf Höhe des Elbe-km 293,5 definiert. Die Zuflussbeträge der Hochwassersimulationen basieren auf den Messungen des LHW und der BfG während des HW 2013.

Entsprechend der Aufgabenstellung und der weiteren Abstimmung mit dem AG sollte für die Hochwassersimulationen ein maximaler Zufluss von Q = 5090 m³/s angesetzt werden. Mit Ausnahme des Szenarios zur Ermittlung des Wehrsteuerungseinflusses, worin eine instationäre Simulation mit der HW-Ganglinie des HW2013 durchzuführen war, wurde der Modellzufluss als quasistationär vorgegeben. Dies trifft auch auf die MQ-Simulation zu, worin der Zufluss auf 554 m³/s festgelegt worden ist.

Für die stationären HW-Simulationen wurde ein Modellzustand verwendet, in dem das Pretziener Wehr über die gesamte Simulationsdauer als vollständig geöffnet angenommen worden ist. Ausgehend von einem Anfangszustand (Anfangswasserstände und Anfangsgeschwindigkeiten) und mit der Festlegung eines quasistationären Zuflusses (Ganglinie mit Q(t) = 5090 m³/s = konstant) wurde die Berechnung jeweils solange fortgeführt, bis der Abfluss am Elbe-km 339,1 (unterer Modellrand) und der Zufluss am Elbe-km 293,5 (oberer Modellrand) ungefähr gleiche Beträge (Q = 5090 m³/s) aufwiesen.

In der MQ-Simulation wurde der Zufluss ausgehend von einem leeren Modell (ohne Anfangswerte) allmählich bis zum Betrag von 554 m³/s gesteigert und anschließend so lange konstant gehalten, bis stationäre Abflussverhältnisse erreicht waren.

Auf die Vorgehensweise in den instationären Simulationen, die zur Untersuchung des Wehrsteuerungseinflusses durchzuführen waren, wird im Abschnitt 3.3 näher eingegangen.

2.3.2 Untere Randbedingung

Um eine abflussabhängige Anpassung der Wasserspiegellage am unteren Modellrand (ca. Elbe-km 339,1) zu gewährleisten, wurde ein Energieliniengefälle als untere Randbedingung festgelegt. Im Zuge der Modellkalibrierung wurde das Energieliniengefälle zu I_E = 0,215 ‰ ermittelt und in allen Simulationen verwendet.

3 VARIANTEN UND SZENARIEN

3.1 SZENARIO 0 - REFERENZ

Im Nachgang der Modellkalibrierung (vgl. STAMM ET AL., 2014) wurde festgestellt, dass die mit dem kalibrierten Modell berechneten Wasserspiegellagen des Elbe-Umflutkanals im Bereich der Haberlandbrücke um ca. 20 cm niedriger waren als die Beobachtungswerte. Aus diesem Grund wurde mit dem AG vereinbart, dass die Rauheitsbelegung der Bewuchsbereiche in diesem Gebiet abweichend von der globalen Definition für „Wald" (k_{St} = 10 $m^{1/3}$/s) auf k_{St} = 5 $m^{1/3}$/s festgelegt werden soll. Die Wahl dieses ungewöhnlich niedrigen k_{St}-Wertes kann dadurch begründet werden, dass während des HW 2013 speziell in diesem Bereich signifikante, bewuchsbedingte Verklausungserscheinungen aufgetreten waren, die zu einem oberwasserseitigen Aufstau führten (Abbildung 3-1). Für weitere Ausführungen dazu wird auf KÜLLIG (2014) verwiesen, worin im Rahmen einer Diplomarbeit der Bewuchseinfluss im EUK bei Hochwasser näher untersucht worden ist.

Abbildung 3-1 – Ausdehnung der Bewuchsbereiche (links) und bewuchsbedingte Verklausungserscheinungen (rechts) im Bereich Haberlandbrücke (Quelle: KÜLLIG, 2014).

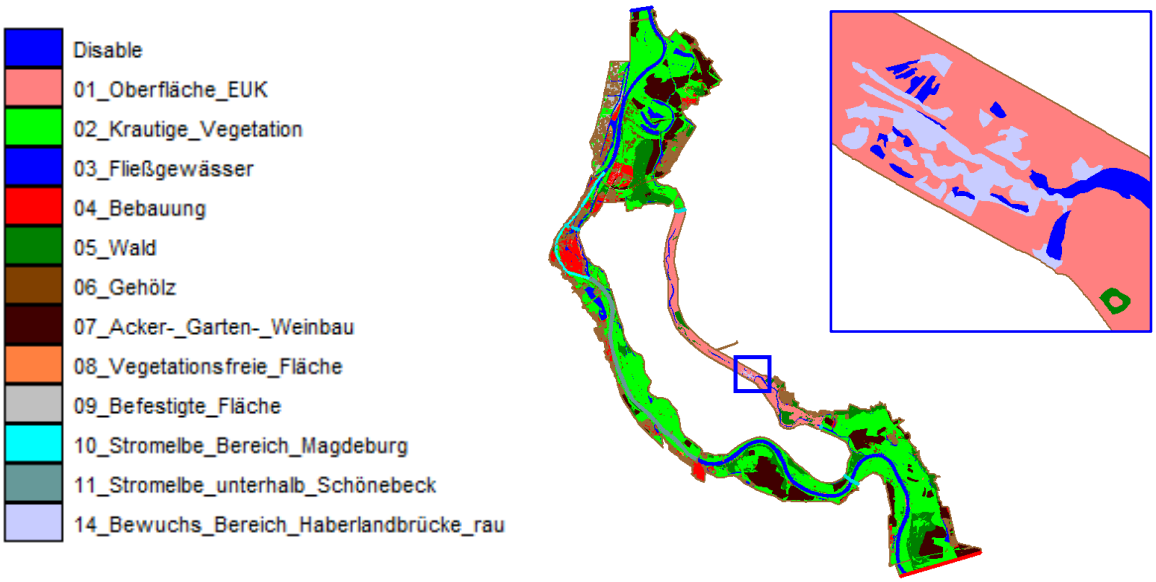


Abbildung 3-2 –Materialdefinitionen für den Referenzzustand (Szenario 0); inkl. neuem Oberflächentyp „14_Bewuchs_Bereich_Haberlandbrücke_rau" (mit k_{St} = 5 $m^{1/3}$/s)

Tabelle 3-1 – Oberflächendefinition und Fließwiderstandsbeiwerte im Referenzzustand (Szenario 0)

Mat.-Nr.	Oberflächentyp	k_{St} [$m^{1/3}/s$]	
		Kalibrierung	Referenz (SZ0)
0	Disable (inaktiv)	-	-
1	01_Oberfläche EUK	25	25
2	02_Krautige Vegetation	18	18
3	03_Fließgewässer	30	30
4	04_Bebauung	25	25
5	05_Wald	10	10
6	06_Gehölz	10	10
7	07_Acker-, Garten- und Weinbau	25	25
8	08_Vegetationsfreie Fläche	20	20
9	09_Befestigte Fläche	40	40
10	10_Stromelbe Bereich Magdeburg	38	38
11	11_Stromelbe unterhalb Schönebeck	38	38
14	**14_Bewuchs Bereich Haberlandbrücke, rau**	**-**	**5**

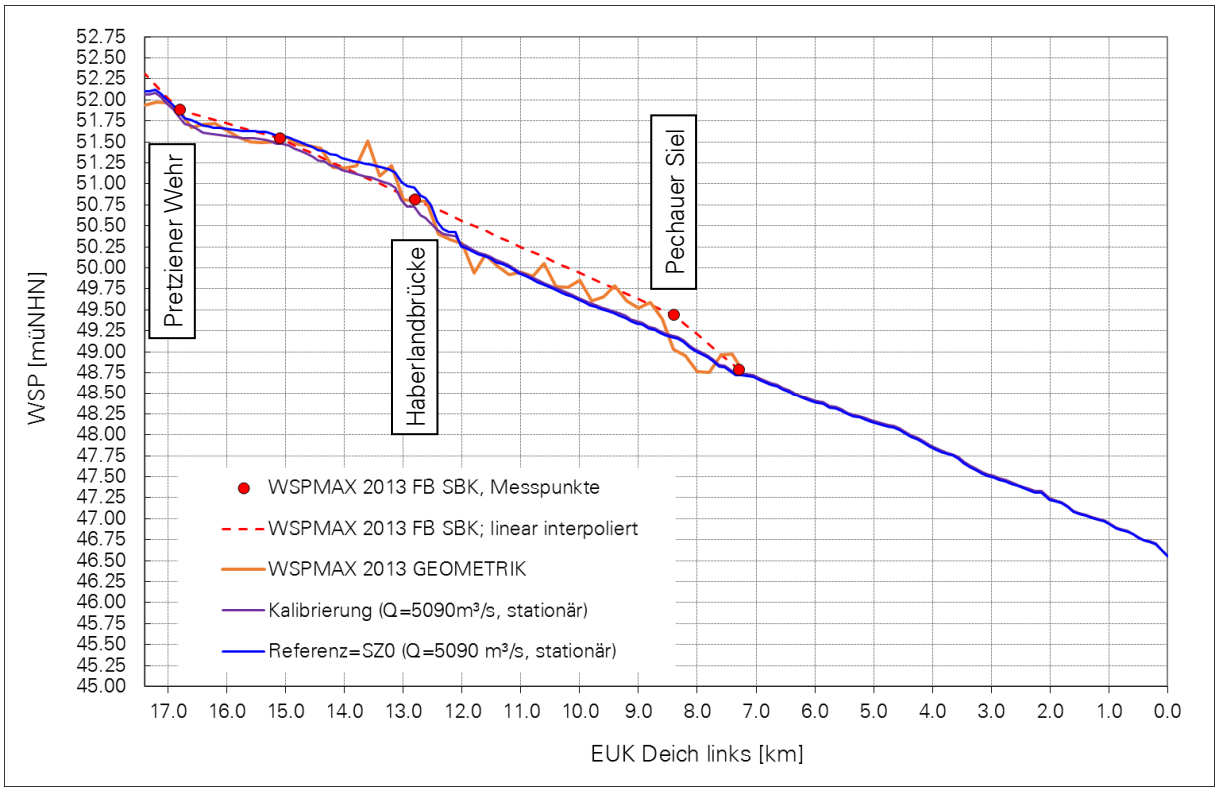


Abbildung 3-3 – Wasserspiegellängsprofile Elbe-Umflutkanal - Vergleich der gemessenen (HW 2013) und berechneten (Simulation: Q=5090 m³/s, stationär) Werte am linken Umflutdeich

Es kann festgestellt werden, dass durch die flächenhafte Erhöhung des Rauheitsbeiwerts (k_{St} = 5 $m^{1/3}/s$) in den Bewuchsbereichen nahe der Haberlandbrücke (ca. Deich-km 12,7) die beobachteten Aufstauerscheinungen (gemessen: 50,81 müNHN; simuliert: 50,86 müNHN) durch das Modell abgebildet werden können. Es wird darauf hingewiesen, dass der Scheitelwasserstand am Pechauer Siel im aktuellen Modellzustand nicht erreicht wird, obwohl für die landwirtschaftliche Nutzfläche unmittelbar unterhalb des Siels bereits ein niedrigerer k_{St}-Wert von 10 $m^{1/3}/s$ (sonst: 25 $m^{1/3}/s$) angesetzt worden ist, um der dort vorhandenen Bewuchssituation zum Zeitpunkt des Hochwassers Rechnung zu tragen.

Versuche, Modellanpassungen ähnlich wie für den Bereich der Haberlandbrücke vorzunehmen (bereichsweise k_{St}-Werte von 5 $m^{1/3}/s$ zur Abbildung von Verklausungserscheinungen), führten bislang nicht zum Erreichen der beobachteten Wasserspiegellage. Deshalb wird empfohlen, speziell diesen Bereich in evtl. zukünftigen Analysen nochmals zu betrachten und ggf. feiner zu diskretisieren, um die beobachteten Strömungsverhältnisse besser abbilden zu können.

Aus den genannten Gründen wurde entschieden, den Modellzustand SZ0 als Referenzzustand für die weiteren Szenarien, die nachfolgend vorgestellt werden, zu betrachten. Tabelle 3-2 enthält eine Gegenüberstellung der Abflussaufteilungen, die im Rahmen der Messungen (durch LHW und BfG) zum Zeitpunkt des Scheiteldurchgangs des HW 2013 und innerhalb des kalibrierten Modelles bzw. des in diesem Abschnitt beschriebenen Referenzzustandes SZ0 (Q=5090 m³/s, stationär) ermittelt worden sind.

Tabelle 3-2 – Abflussaufteilung in Messungen, im kalibrierten Modell und im Referenzzustand (SZ0)

Bereich		LHW		BfG	Simulation	
		08.06.2013	09.06.2013	09.06.2013	Kalibrierung	Referenz (SZ0)
Q_{Ges}	[m³/s]	4955	5034	5146	5090	5090
	[%]	100	100	100	100	100
Q_{EUK}	[m³/s]	1290	1272	1259	1248	1235
	[%]	26,0	25,3	24,5	24,5	24,3
$Q_{Stadtstrecke}$	[m³/s]	3665	3762	3887	3842	3855
	[%]	74,0	74,7	75,5	75,5	75,7
$Q_{Stromelbe}$	[m³/s]	1976	2049	-	1925	1931
	[%]	39,9	40,7	-	37,8	37,9
$Q_{Alte\ Elbe}$	[m³/s]	1426	1434	1687	1588	1594
	[%]	28,0	28,2	33,1	31,2	31,3
Q_{Rest}	[m³/s]	263 (Zollelbe)	280 (Zollelbe)	-	329	330
	[%]	5,3	5,5	-	6,5	6,5

Gegenüber dem kalibrierten Zustand fließen im neuen Referenzzustand 13 m^3/s (entspricht 0,25 % des Gesamtabflusses) weniger durch den EUK bzw. mehr über die Stadtstrecke. Dies ist auf die höheren Wasserstände ab dem Bereich der Haberlandbrücke im EUK zurückzuführen, die einen Rückstau und eine damit verbundene geringfügige Änderung der Abflussaufteilung zugunsten der Stadtstrecke bewirken. Die prozentuale Aufteilung zwischen Stromelbe und Alter Elbe bleibt annähernd unverändert mit Abweichungen zum Kalibrierungszustand von unter 0,12% (ΔQ= 6 m³/s).

3.2 SZENARIO 1 – BEWUCHSREDUZIERUNG ELBE-UMFLUTKANAL

3.2.1 Entfernung ausgewählter Bewuchsbereiche im EUK (SZ1T)

Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

- Entfernung von Mittel- und Großbewuchs in acht ausgewählten Bereichen im EUK, welche auf Grundlage einer Shape-Datei (Dateien: Bewuchsreduzierung.shp, Polygon), die durch den LHW bereitgestellt wurde, festgelegt worden sind
- modellhafte Bewuchsentfernung durch Zuweisung des Oberflächentyps „01_Oberfläche_EUK“ (mit k_{st} = 25 $m^{1/3}/s$) für die Elemente innerhalb der festgelegten Bereiche, sofern der ursprüngliche Oberflächentyp (Referenzzustand) als:
    - „02_Krautige_Vegetation“
    - „05_Wald“
    - „06_Gehölz“
    - „07_Acker-, Garten-, Weinbau“

- „14_Bewuchs_Bereich_Haberlandbrücke_rau“

definiert war (Abbildung 3-4)

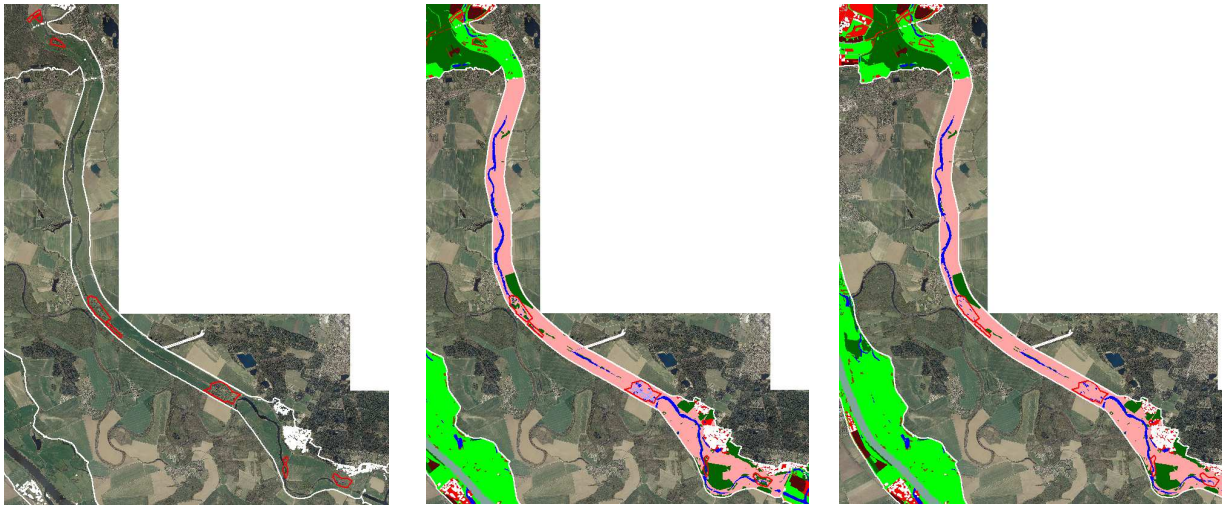


Abbildung 3-4 – Vergleich der Oberflächentypen im EUK für den Referenzzustand (Mitte) und für das Szenario SZ1T (rechts) mit teilweiser Entfernung von Mittel- und Großbewuchs in ausgewählten Bereichen (rote Markierungen) im EUK

3.2.2 Globale Anpassung des Widerstandsbeiwerts im EUK (SZ130)

Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

- Festlegung eines konstanten Widerstandsbeiwertes von $k_{st} = 30\ m^{1/3}/s$ (Oberflächentyp „12_EUK_global“) für alle Elemente innerhalb des EUK für den Bereich Pretziener Wehr bis Straßenbrücke Heyrothsberge mit Ausnahme der Elemente mit Oberflächentyp „04_Bebauung“
- Festlegung von $k_{st} = 30\ m^{1/3}/s$ erfolgte in Anlehnung an Oberflächendefinition „03_Fließgewässer“ (deshalb keine weitere Differenzierung in Elemente „03_Fließgewässer“ innerhalb des EUK in SZ130)

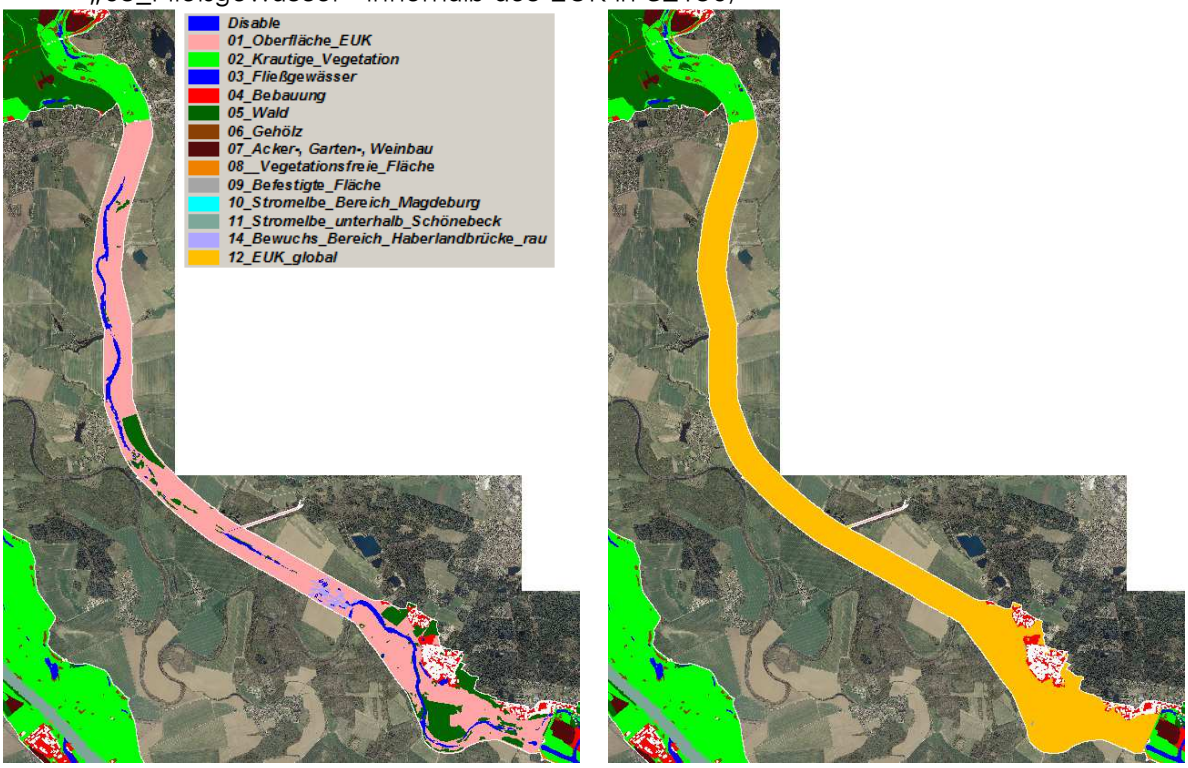


Abbildung 3-5 – Oberflächentypen für den Referenzzustand SZ0 und das Szenario SZ130 mit Oberflächentyp „12_EUK_global“ mit k_{St} = 30 $m^{1/3}$/s (mit Ausnahme bebauter Flächen)

3.3 SZENARIO 2 –ÖFFNUNGSZEITPUNKT PRETZIENER WEHR

Innerhalb des Szenarios 2 sollte untersucht werden, ob ein zeitigeres Öffnen des Pretziener Wehrs Auswirkungen auf die Scheitelwerte des HW 2013 (Abfluss, Wasserstände) gehabt hätte. Ausgehend vom realen Zeitpunkt der Wehröffnung während des HW 2013 (03.06.2013, ca. 15:15 Uhr), der gemäß der aktuell gültigen Wehröffnungsvorschrift (LHW, 2005) gewählt worden ist, wurde eine Öffnung simuliert, die bereits 15 h vorher (03.06.2013, ca. 00:15 Uhr) stattgefunden hätte. Als Zuflussrandbedingung für die Simulationen wurde die Abflussganglinie des HW 2013 für den Zeitraum vom 30.05.2013, 9:45 Uhr bis 10.06.2013, 12:15 Uhr vorgegeben. Die simulierten Wehröffnungszeitpunkte werden anhand der Tabelle 3-3 und der in Abbildung 3-6 dargestellten Abflussganglinien veranschaulicht.

Tabelle 3-3 – Charakteristiken der realen und fiktiven Öffnung des Pretziener Wehrs beim HW2013

Datum	Q_{Barby} [m³/s]	W_{Barby} [müPN]	Bemerkung	Szenario
03.06.13, 00:15	1580	5,25	angenommener Öffnungszeitpunkt HW2013	SZ2_1-1
03.06.13, 15:15	1780	5,59	tatsächlicher Öffnungszeitpunkt HW2013	SZ2_1-2

Die Simulationen zur Untersuchung des Einflusses des Wehröffnungszeitpunktes erfolgten dreigeteilt nach folgendem Vorgehen:

1. quasistationäre Simulation für Q = 1000 m³/s; Pretziener Wehr geschlossen

2. instationäre Simulation (SZ2_0) für:
   - Pretziener Wehr geschlossen
     - Zeitraum 30.05.2013, 9:45 Uhr bis 03.06.2013, 15:00 Uhr
     - hydraulische Anfangsbedingung aus 1.

3. instationäre Simulation für:
   - SZ2_1-1: vorzeitige Öffnung des Pretziener Wehrs
     - Öffnungszeitpunkt: 03.06.2013; 00:15 Uhr
     - W_{Barby}: 5,25 müPN
     - Q_{Barby}: 1580 m³/s
     - Simulationsdauer: 03.06.2013, 00:15 Uhr - 10.06.2013, 12:15 Uhr
     - hydr. Anfangsbedingungen: aus 2., Zeitpunkt: 03.06.2013, 00:00 Uhr

   - SZ2_1-2: reale Öffnung des Pretziener Wehrs
     - Öffnungszeitpunkt: 03.06.2013; 15:15 Uhr
     - W_{Barby}: 5,59 müPN
     - Q_{Barby}: 1780 m³/s
     - Simulationsdauer: 03.06.2013, 15:15 Uhr - 10.06.2013, 12:15 Uhr
     - hydr. Anfangsbedingungen: aus 2., Zeitpunkt 03.06.2013, 15:00 Uhr

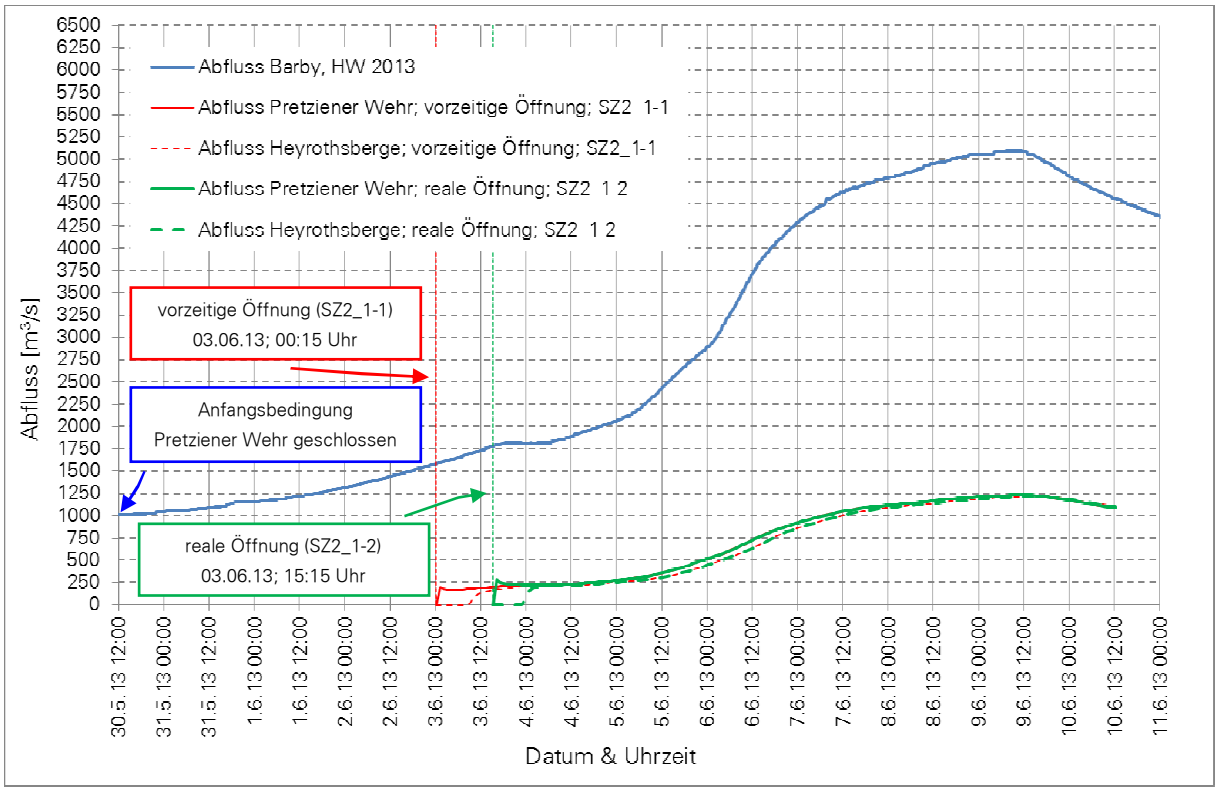


Abbildung 3-6 – Simulierte Abflussganglinien im Bereich des Elbe-Umflutkanals
(Szearien 2_1-1 und 2_1-2; HW-Ganglinie 2013, Q_{max} = 5090 m³/s, instationär)

3.4 SZENARIO 3 - BEWUCHSREDUZIERUNG ALTE ELBE

3.4.1 Bewuchsentfernung im Bereich Alte Elbe in Magdeburg (SZ3)

Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

- Vergabe eines einheitlichen Oberflächentyps mit Widerstandsbeiwert k_{st} = 30 $m^{1/3}/s$ für Modellelemente, die sich innerhalb des Gewässerbettes der Alten Elbe im Stadtgebiet Magdeburgs befinden (vollständige Entfernung von Groß- und Mittelbewuchs in diesem Bereich, Abbildung 3-7)

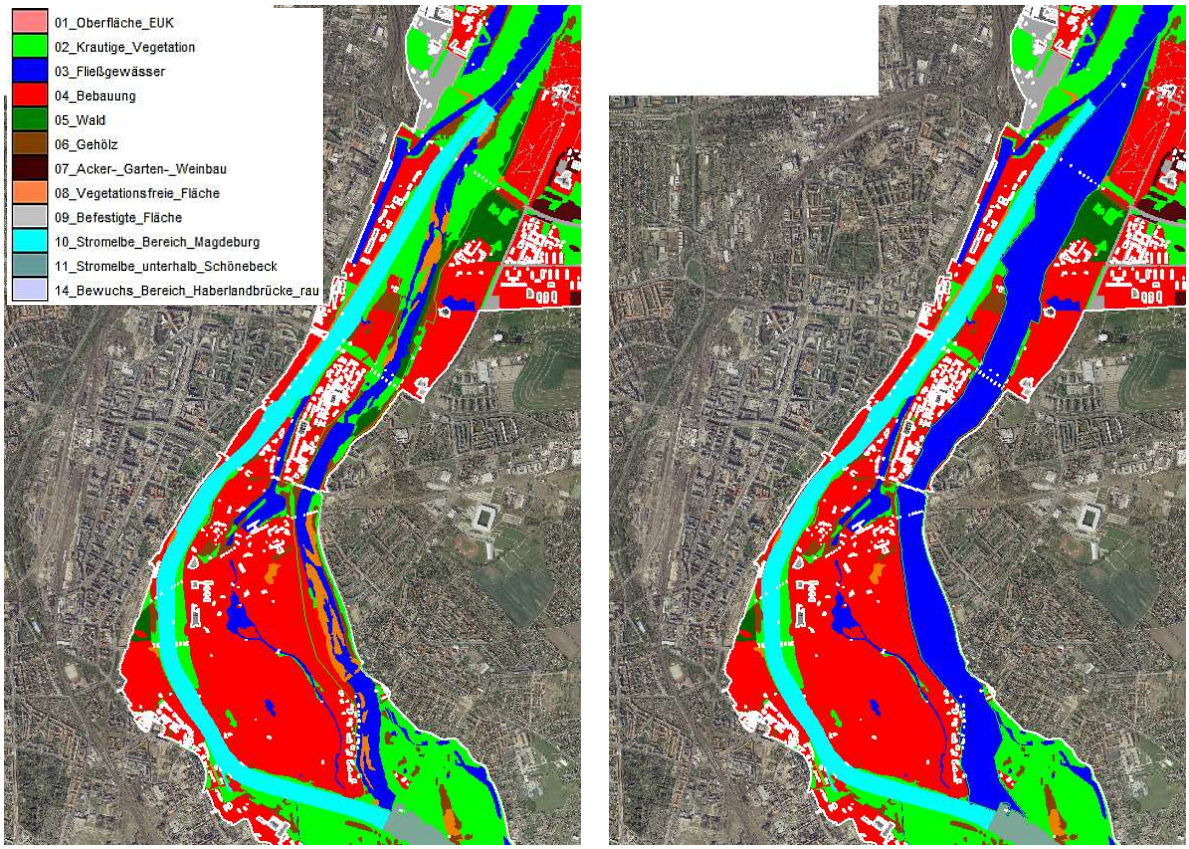


Abbildung 3-7 – Oberflächentypen für den Referenzzustand SZ0 (links) und das Szenario SZ3 (rechts) mit einheitlichem Oberflächentyp „03_Fließgewässer" (k_{St} = 30 $m^{1/3}/s$) im Bereich der Alten Elbe im Stadtgebiet Magdeburgs

3.4.2 Bewuchsentfernung im Bereich Alte Elbe in Magdeburg mit Sedimentabtrag (SZ3S)

Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

- Vergabe eines einheitlichen Oberflächentyps mit Widerstandsbeiwert k_{St} =30 $m^{1/3}/s$ für Modellelemente, die sich innerhalb des Gewässerbettes der Alten Elbe im Stadtgebiet Magdeburgs befinden (entspricht vollständiger Entfernung von Groß- und Mittelbewuchs in diesem Bereich) -> Oberflächendefinitionen wie in SZ3 (vgl. Abbildung 3-7)
- Modellierung der Sedimententnahme bzw. Neuprofilierung des Flussbetts der Alten Elbe über Höhenanpassung von Berechnungsknoten innerhalb eines vorgegebenen Gebiets (siehe Abbildung 3-8)
- Bemerkungen:
    - keine Modifikationen im Bereich des Cracauer Wehrs (Bauwerk unverändert)
    - keine Veränderung der Geländehöhen im Bereich „Kleiner Wasserfall" (felsiger Untergrund)
    - Modellierung der Sedimententnahme (entspricht Umprofilierung der Alten Elbe) erfolgte nach Vorgaben und in Abstimmung mit LHW

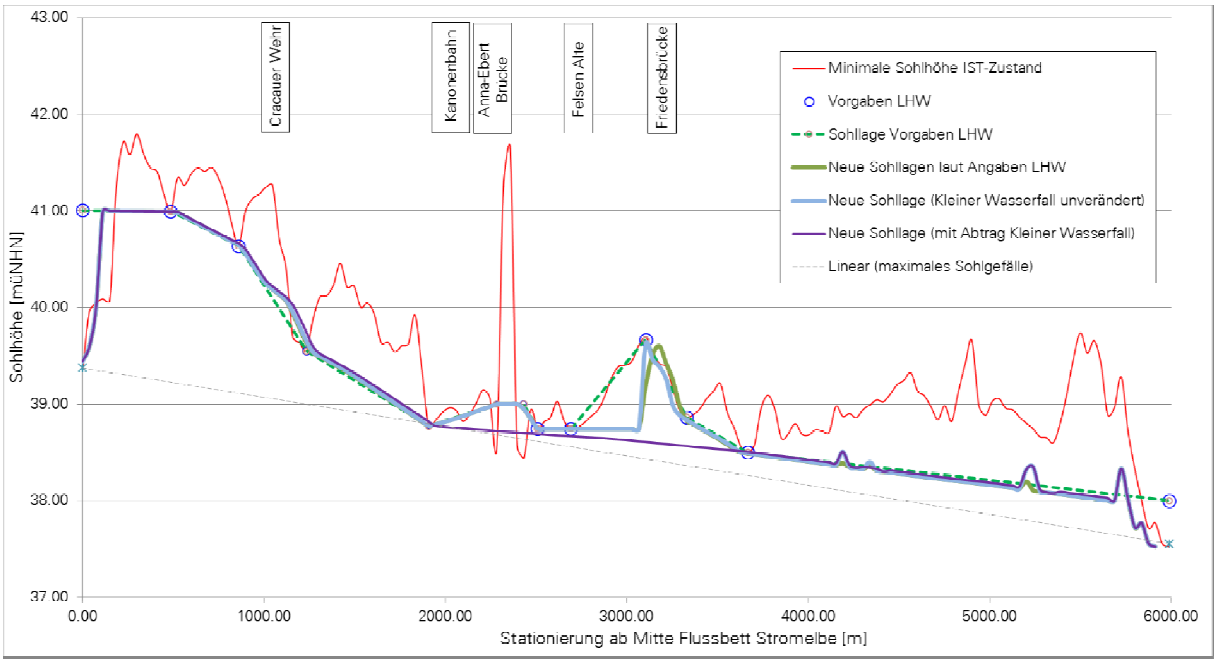


Abbildung 3-8 – Vergleich zwischen bestehender und modifizierter Sohle im Bereich der Alten Elbe (blau: Sohllage für SZ3S und SZ4S; lila: Sohllage für SZ4SF)

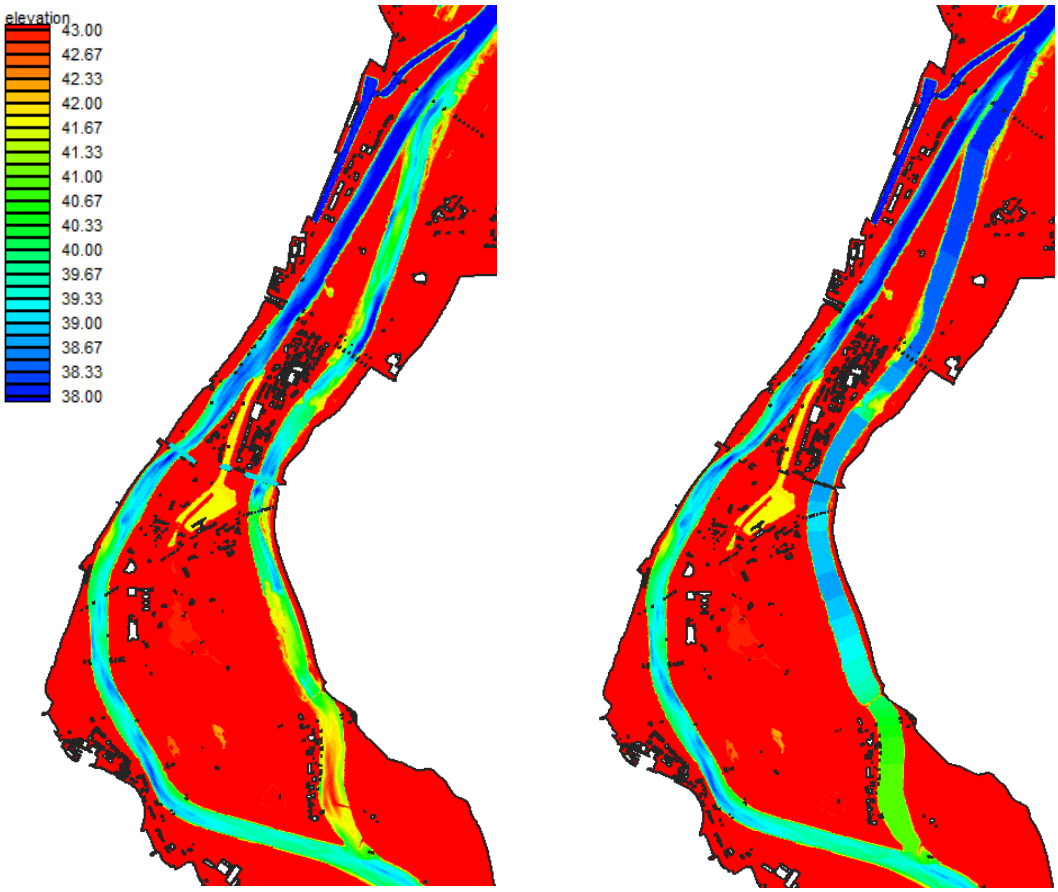


Abbildung 3-9 – Geländehöhen [müNHN] für den Modellbereich Alte Elbe im Referenzzustand SZ0 (links) und im Szenario SZ3S (rechts)

3.5 SZENARIO 4 – EINFLUSS CRACAUER WEHR

3.5.1 Rückbau des Cracauer Wehrs (SZ4)

Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

- Rückbau des Cracauer Wehrs durch Angleichung der Höheninformation der Berechnungspunkte im relevanten Bereich an umgebende Sohlhöhen
- Bemerkungen:
  - Oberflächendefinitionen unverändert
  - sonstige Sohlhöhen Alte Elbe unverändert

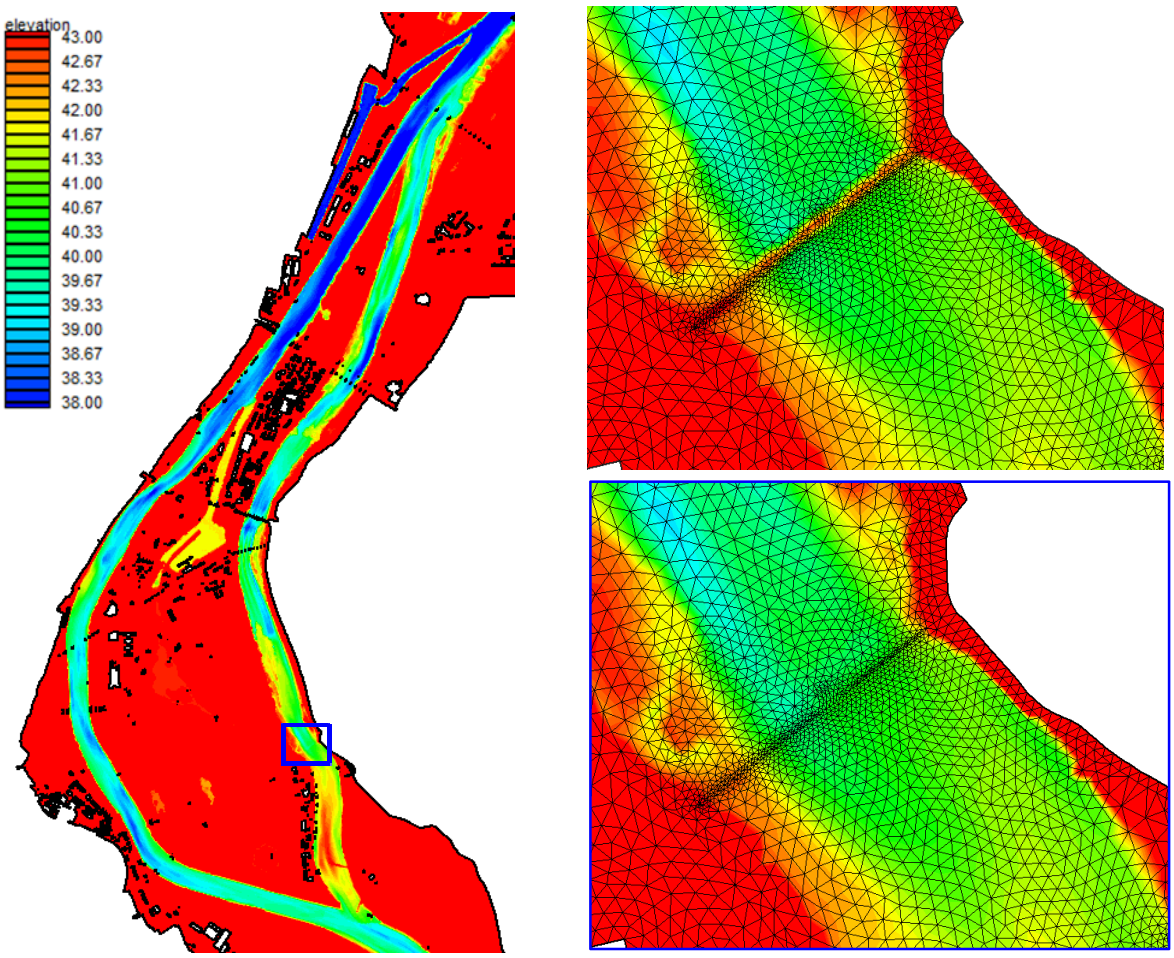


Abbildung 3-10 – Geländehöhen [müNHN] für den Modellbereich Alte Elbe im Szenario SZ4 (links) und Detaildarstellung im Bereich des Cracauer Wehrs für den Referenzzustand SZ0 (rechts, oben) und das Szenario SZ4 (rechts, unten)

3.5.2 Entfernung des Cracauer Wehres und Sedimentabtrag im Bereich Alte Elbe (außer „Kleiner Wasserfall“) (SZ4S)

Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

- Rückbau des Cracauer Wehrs durch Angleichung der Höheninformation der Berechnungspunkte im relevanten Bereich an umgebende Sohlhöhen (wie SZ4)
- Modellierung einer Sedimententnahme bzw. Neuprofilierung des Flussbetts der Alten Elbe im definierten Bereich über Höhenanpassung von Berechnungsknoten mit Ausnahme des „Kleinen Wasserfalls“ (wie SZ3S, vgl. Abbildung 3-8)

- Anpassung des Oberflächentyps von Elementen innerhalb des vorgegebenen Abtragsbereichs auf Typ „13_Oberfläche_Alte Elbe“ mit $k_{St} = 30\ m^{1/3}/s$ (Bereich schmaler als im Szenario 3S, so dass Vegetationszonen in Randbereichen unverändert sind, siehe Abbildung 3-12)

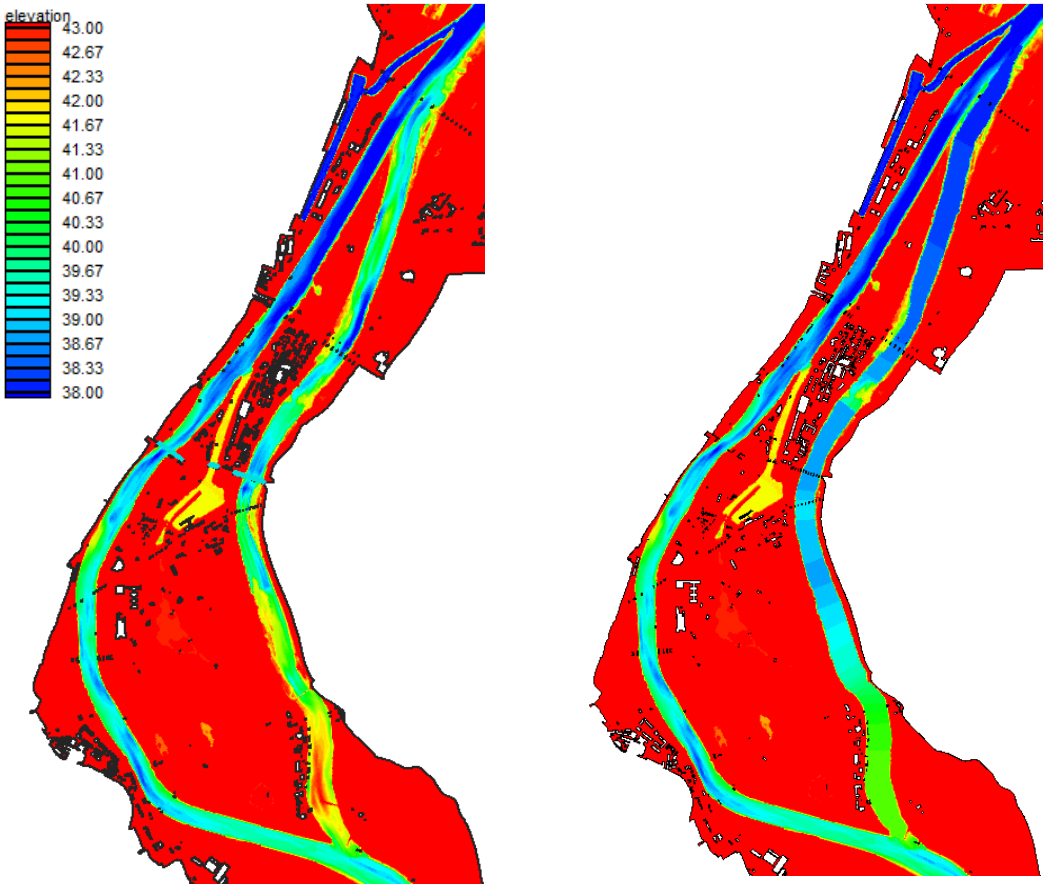


Abbildung 3-11 – Geländehöhen [müNHN] für den Modellbereich Alte Elbe im Referenzzustand SZ0 (links) und im Szenario SZ4S (rechts)

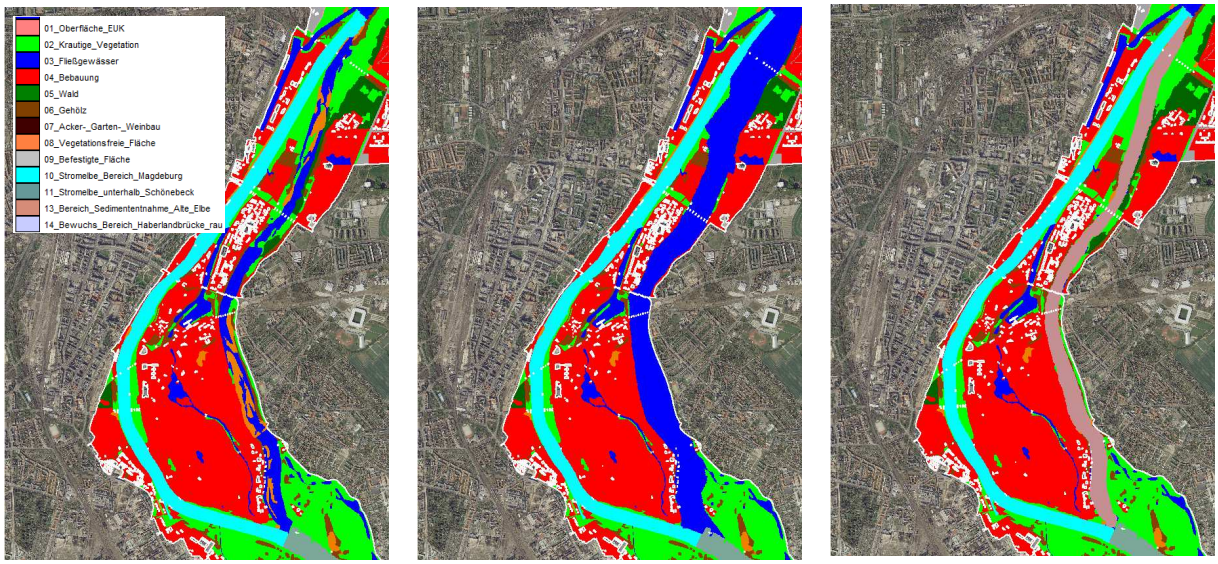


Abbildung 3-12 – Oberflächentypen im Referenzzustand SZ0 (links), im Szenario 3/3S (Mitte) und in den Szenarien SZ4S/SZ4SF (rechts, mit Oberflächentyp „13_Bereich_Sedimententnahme_Alte_Elbe“ (mit $k_{St} = 30\ m^{1/3}/s$) in Abtragsbereichen der Alten Elbe)

3.5.3 Entfernung des Cracauer Wehres und Sedimentabtrag im Bereich Alte Elbe sowie Abtrag „Kleiner Wasserfall“ (SZ4SF)

Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

wie SZ4S; zusätzlich Abtrag des Felsens „Kleiner Wasserfall“ durch Höhenanpassung der Berechnungsknoten im entsprechenden Bereich (vgl. Abbildung 3-8 und Abbildung 3-13)

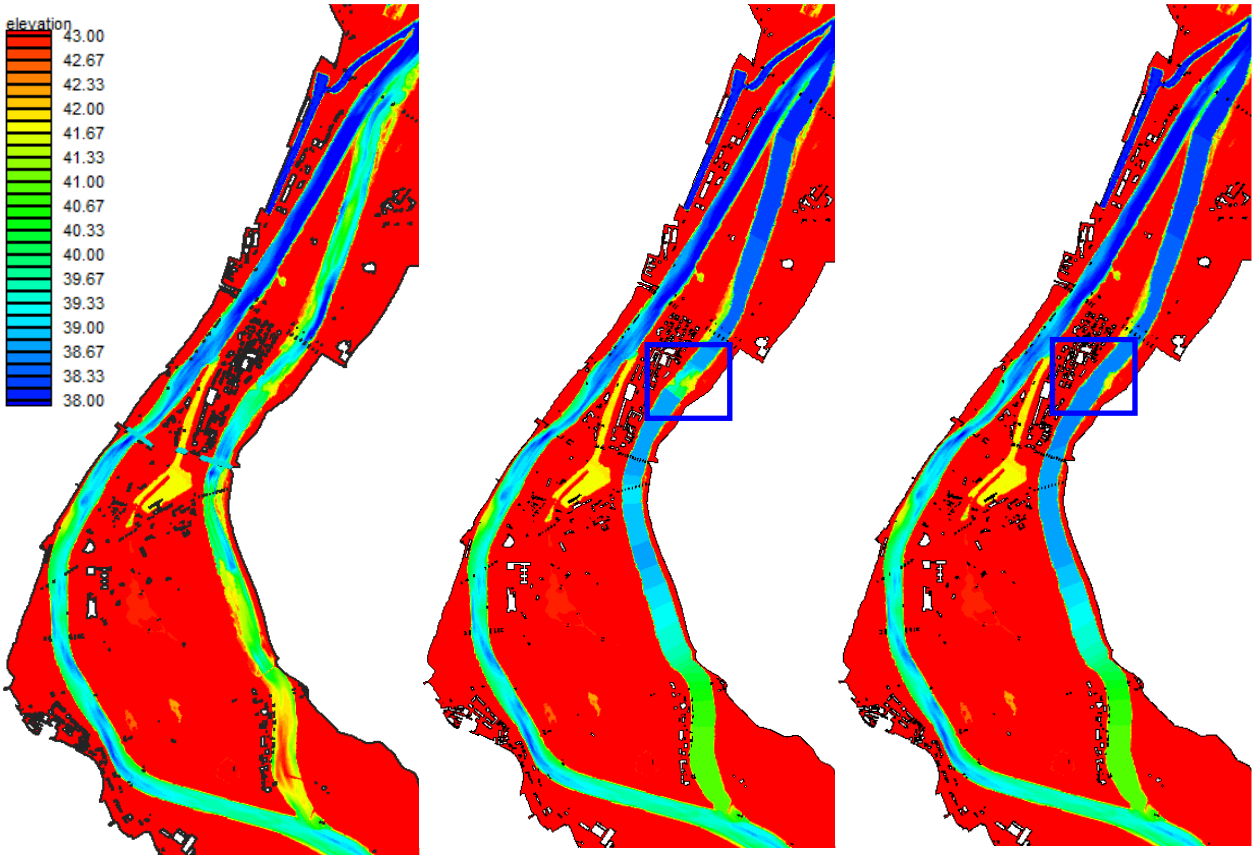


Abbildung 3-13 – Geländehöhen [müNHN] für den Modellbereich Alte Elbe im Referenzzustand SZ0 (links), im Szenario SZ4S (Mitte) und im Szenario SZ4SF (rechts)

Tabelle 3-4 enthält zusammenfassend die Sedimentvolumenbilanzen, die sich aus den modellierten Umprofilierungen der Alten Elbe in den Szenarien SZ3S, SZ4S und SZ4SF ergeben.

Tabelle 3-4 – modellierte Sedimentbewegungen in den Szenarien SZ3S, SZ4S und SZ4SF

Szenario	Abtrag [m³]	Auffüllung [m³]	Gesamt [m³]
SZ3S, SZ4S	-900.000	+15.000	-885.000
SZ4SF	-953.000	+13.000	-940.000

3.6 SZENARIO 5 – RÜCKBAU KANONENBAHNBRÜCKEN

Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

- Rückbau der Kanonenbahnbrücken in Alter Elbe und im Elbe-Umflutkanal durch Herausnahme der Brückenpfeiler (über Einfügen überströmbarer Elemente; Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16, oben)
- Anpassung des Oberflächentyps neu eingefügter Elemente an angrenzende Bereiche (Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16, unten)
- Abtrag des westlichen Zufahrtsdammes zur Kanonenbahnbrücke im EUK durch Angleichen der Höheninformation der Berechnungsknoten in diesem Bereich (Abbildung 3-16, oben)
- Bemerkung:
    - Keine Veränderungen der Geländehöhen in Alter Elbe

Abbildung 3-14 – Lage der Kanonenbahn-Brücken im Untersuchungsgebiet

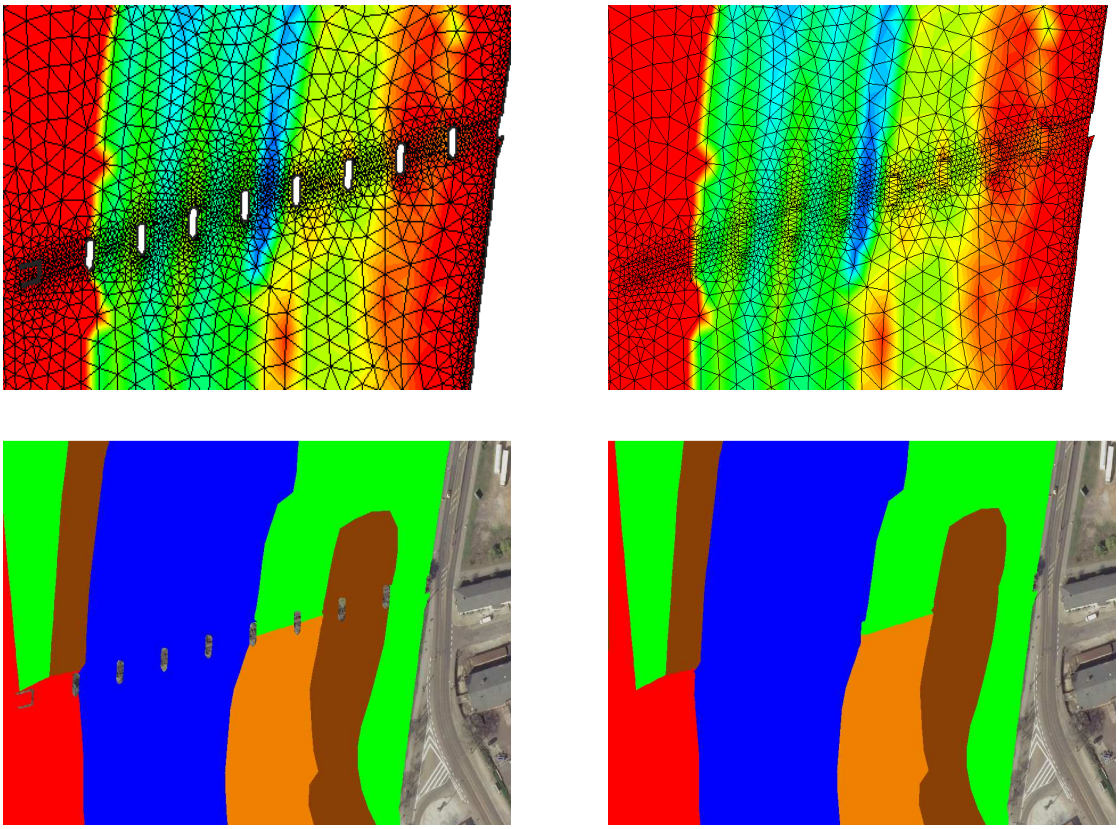


Abbildung 3-15 – Vergleich des Referenzzustands SZ0 und des Szenarios SZ5 im Bereich der Kanonenbahn in der Alten Elbe (oben – Geländehöhen, unten-Oberflächentypen)

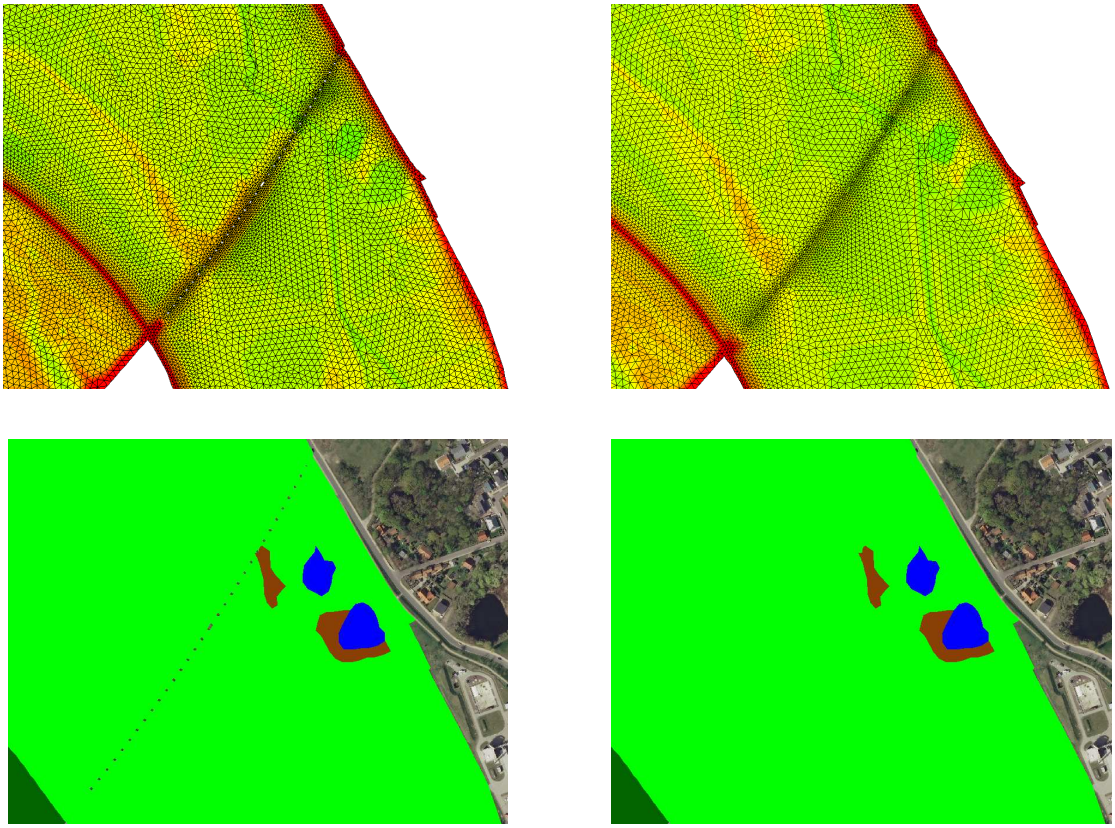


Abbildung 3-16 – Vergleich des Referenzzustands SZ0 und des Szenarios SZ5 im Bereich der Kanonenbahn im Elbe-Umflutkanal (oben - Geländehöhen, unten - Oberflächentypen)

3.7 SZENARIO 6 - MQ

Die MQ-Simulationen erfolgten mit einem Modellzustand mit geschlossenem Pretziener Wehr, so dass der Elbe-Umflutkanal in diesem Fall nicht beaufschlagt wird. Als Zuflussrandbedingung wurde ein Durchfluss von 554 m^3/s definiert. Dieser Wert entspricht dem gültigen Mittelwasserabfluss am Pegel Barby zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung (UNDINE, 2013).

3.8 SZENARIO 7 - MAXIMALVARIANTE

Nachdem in den Szenarien 1 bis 5 die separaten Wirkungen von Einzelmaßnahmen untersucht und ausgewertet worden sind, wurde in Abstimmung mit dem LHW ein Szenario 7 erstellt, das nachfolgend auch als Maximalvariante bezeichnet wird, welches die effektivsten der untersuchten Maßnahmen zusammengefasst. Somit ergaben sich folgende Modifikationen bezüglich des Referenzzustands:

- Vergabe eines einheitlichen Oberflächentyps mit $k_{St} = 30\ m^{1/3}/s$ für Elemente im EUK (wie SZ130)
- Herausnahme des Cracauer Wehrs mit Sedimentabtrag, jedoch ohne Abtrag des „Kleinen Wasserfalls“ (wie SZ4S)
- Vergabe eines einheitlichen Oberflächentyps mit $k_{St} = 30\ m^{1/3}/s$ für Elemente in Alter Elbe (wie SZ3)
- Rückbau der Brücke „Kanonenbahn“ in Alter Elbe (wie SZ5, jedoch „Kanonenbahnbrücke“ im EUK unverändert)

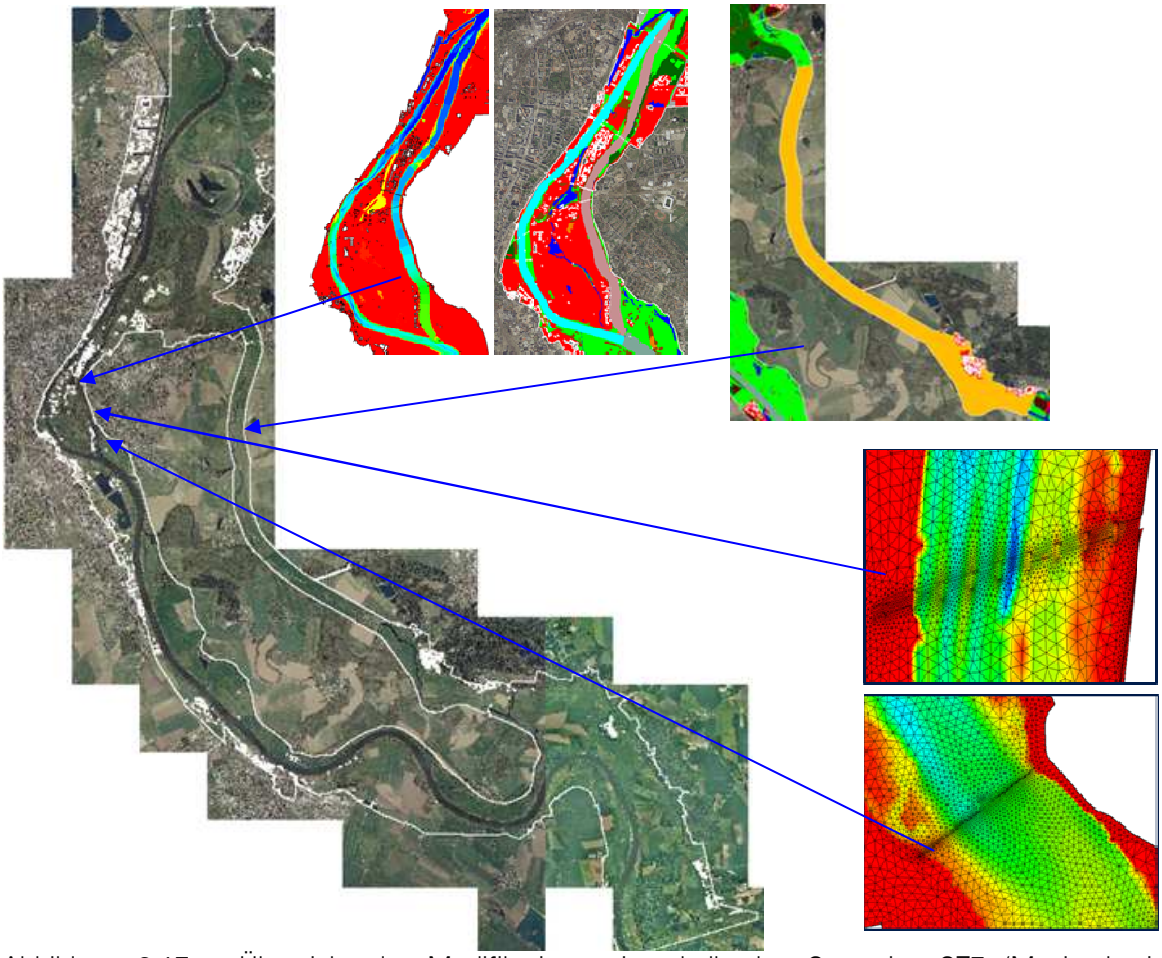


Abbildung 3-17 – Übersicht der Modifikationen innerhalb des Szenarios SZ7 (Maximalvariante) bezüglich des Referenzzustands SZ0

4 ERGEBNISSE

4.1 AUSWERTUNGSMETHODIK

Die Auswertungen der Simulationsergebnisse für die Szenarien, in denen Hochwasserabflüsse betrachtet wurden, umfassen jeweils folgende Teile:

- Vergleich der Abflussaufteilungen
- Differenzenbildung der Wasserspiegellagen für den gesamten Modellbereich
- Differenzenbildung der Wasserspiegellagen in Gewässerlängsprofilen (Stromelbe, Alte Elbe, Elbe-Umflutkanal)

4.1.1 Vergleich der Abflussaufteilungen

Ausgehend von den Messungen während des HW 2013 werden die absoluten und prozentualen Teilabflüsse in den relevanten Gewässerstrecken tabellarisch dargestellt. Die ermittelten Beträge wurden auf ganze Zahlen gerundet. Die prozentualen Angaben beziehen sich jeweils auf den Gesamtabfluss von Q = 5090 m³/s.

4.1.2 Wasserspiegeldifferenzen für den gesamten Modellbereich

Ausgehend von der Wasserspiegellage, die im Referenzzustand SZ0 innerhalb der stationären Abflusssimulation mit Q=5090 m³/s im Untersuchungsgebiet ermittelt worden ist, wird die Wasserspiegellage, die sich für die Szenarien bei gleichen hydraulischen Randbedingungen ergibt, gegenübergestellt. Dies erfolgt durch Differenzenbildung nach folgender Rechenvorschrift:

$$\Delta WSP = WSP_{SZ0} - WSP_{SZx}$$

Somit gilt:

- $\Delta WSP > 0$ → Wasserspiegelreduzierung in Szenario SZx
- $\Delta WSP < 0$ → Wasserspiegelanhebung in Szenario SZx

Die Auswertungen erfolgten auf Basis der Ergebnis-Rasterdatensätze (Rasterweite: 5m) des Referenzzustands und der Szenarien. Wasserspiegelanhebungen ($\Delta WSP < 0$) sind in den grafischen Darstellungen rot und Wasserspiegelreduzierungen ($\Delta WSP > 0$) blau gekennzeichnet, wobei eine weitere farbliche Abstufung in Abhängigkeit vom Differenzenbetrag vorgenommen worden ist. Bereiche, in denen nur geringfügige Veränderungen in den Wasserspiegellagen ermittelt worden sind ($|\Delta WSP|<1$cm), sind grau markiert.

4.1.3 Wasserspiegellagen in Gewässerlängsprofilen

Ausgehend von den Rasterdatensätzen (Rasterweite: 5m) der Wasserspiegellagen für den Referenzzustand und die Szenarien wurden Gewässerlängsschnitte für die Bereiche der Stromelbe, der Alten Elbe und des Elbe-Umflutkanals erstellt. Im Falle der Stromelbe und der Alten Elbe wurden die Längsschnitte ungefähr in Flussmitte, im Falle des Elbe-Umflutkanals entlang des linken Umflutdeiches geführt.

Neben dem Vergleich der absoluten Werte der Wasserspiegellagen wurde weiterhin ein Graph erstellt, der die WSP-Differenzen, die sich an der jeweiligen Station ergeben, ausweist. Die Differenzenbildung erfolgte auch hier nach der Vorschrift:

$\Delta WSP = WSP_{SZ0} - WSP_{SZx}$

, so dass gilt:

- $\Delta WSP > 0$ → Wasserspiegelreduzierung in Szenario SZx
- $\Delta WSP < 0$ → Wasserspiegelanhebung in Szenario SZx.

Es wird darauf hingewiesen, dass sich der Graph der WSP-Differenzen auf die sekundäre Ordinate der Diagramme bezieht, welche aus Gründen der einfacheren Interpretierbarkeit der Ergebnisse mit umgekehrter Richtung (negativ=oben, positiv=unten) dargestellt ist. Somit sind Wasserspiegelreduzierungen bzw. –anhebungen in den Diagrammen intuitiv erkennbar.

4.2 SZENARIO SZ1T UND SZ130

4.2.1 Abflussaufteilung

Tabelle 4-1 enthält eine Gegenüberstellung der Abflussaufteilungen für die Szenarien SZ1T und SZ130 (Q=5090 m³/s, stationär).

Tabelle 4-1 – Vergleich der Abflussaufteilung in Messungen und in Szenarien SZ1T bzw. SZ130

Abfluss		LHW		BfG	Simulation		
		08.06.2013	09.06.2013	09.06.2013	SZ0	SZ1T	SZ130
Q_{Ges}	[m³/s]	4955	5034	5146	5090	5090	5090
	[%]	100	100	100	100	100	100
Q_{EUK}	[m³/s]	1290	1272	1259	1235	1279	1372
	[%]	26,0	25,3	24,5	24,3	25,1	27,0
$Q_{Stadtstrecke}$	[m³/s]	3665	3762	3887	3855	3811	3729
	[%]	74,0	74,7	75,5	75,7	74,9	73,0
$Q_{Stromelbe}$	[m³/s]	1976	2049	-	1931	1912	1873
	[%]	39,9	40,7	-	37,9	37,6	36,8
$Q_{Alte\ Elbe}$	[m³/s]	1426	1434	1687	1594	1575	1535
	[%]	28,0	28,2	33,1	31,3	30,9	30,2
Q_{Rest}	[m³/s]				330	324	310
	[%]				6,5	6,4	6,0

In beiden Simulationen wird die zu erwartende Erhöhung des Abflusses im Bereich des EUK bestätigt. In den Szenarien erhöht sich der Teilabfluss über den EUK um 44 m^3/s (SZ1T) bzw. um 137 m^3/s (SZ130), so dass sich der Abfluss über die Stadtstrecke Magdeburg entsprechend reduziert. Die prozentuale Aufteilung des Abflusses über die Stromelbe und die Alte Elbe im Stadtgebiet Magdeburgs bleibt jedoch unbeeinflusst.

4.2.2 Wasserspiegeldifferenzen

In Abbildung 4-1 sind die Wasserspiegeldifferenzen im gesamten Modellgebiet für die Szenarien SZ130 und SZ1T dargestellt.

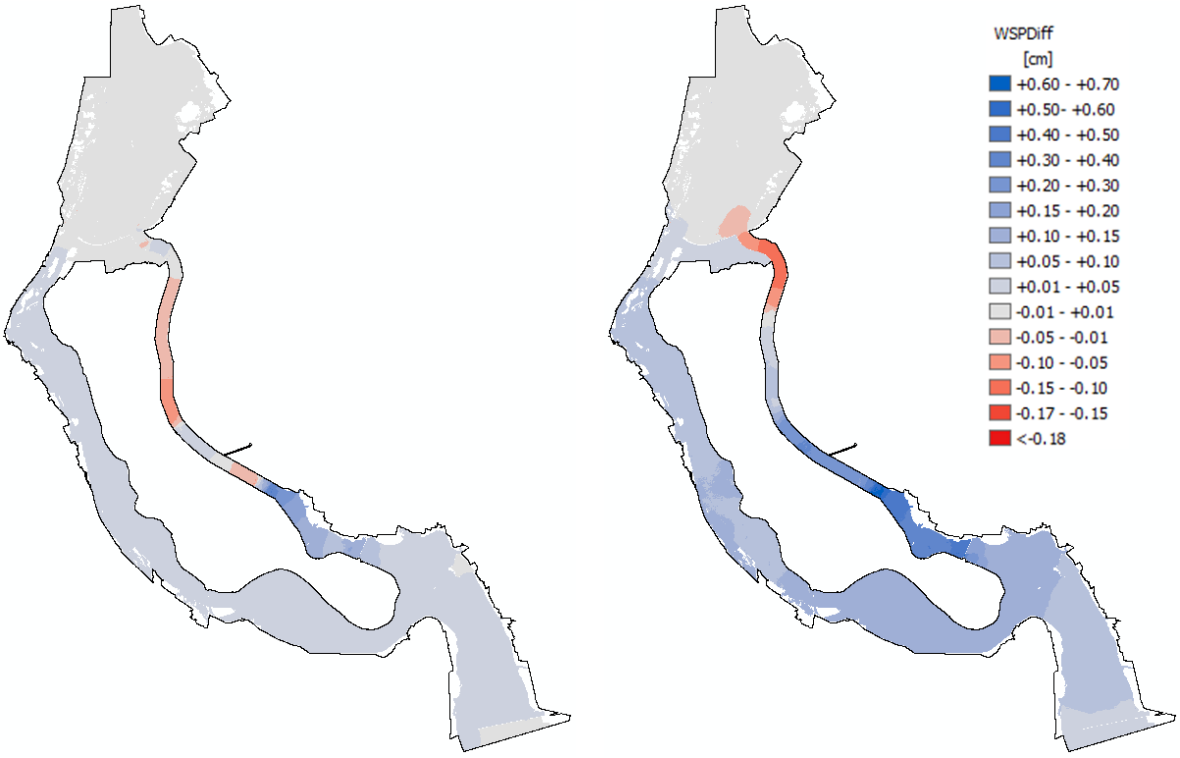


Abbildung 4-1 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) der Szenarien SZ1T (links) und SZ130 (rechts) mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk)

In beiden Grafiken ist zu erkennen, dass die Reduzierung des Fließwiderstands im Elbe-Umflutkanal, die sich aus der modellierten Bewuchsreduzierung ergibt, trotz eines größeren Abflusses bereichsweise zu niedrigeren Wasserspiegellagen führt. Im Szenario SZ130 werden im Bereich der Haberlandbrücke die größten flächigen Absenkungen von bis zu ca. 70 cm erzielt. An gleicher Stelle ergeben sich im Szenario SZ1T Absenkungen von ca. 30-40 cm. Diese besitzen auch Auswirkungen nach oberstrom, so dass im Oberwasser des Pretziener Wehrs ca. 1-6 cm (SZ1T) bzw. 2-10 cm (SZ130) niedrigere Wasserstände auftreten.

Es zeigen sich jedoch auch Bereiche, in denen eine geringfügige Anhebung der Wasserspiegellagen ermittelt worden ist. Im Szenario SZ1T befinden sich diese vorrangig unterhalb der Haberlandbrücke sowie unterhalb der Ortslage Pechau mit Beträgen von ca. 1 – 5 cm. Im Szenario SZ130 ergeben sich höhere Wasserspiegellagen im Ausmündungsbereich mit Anhebungen von bis zu 13 cm.

Aufgrund der geänderten Abflussaufteilung ergeben sich Wasserspiegelabsenkungen auch für den Bereich der Stadtstrecke Magdeburg. Hinsichtlich der Beträge und der Entwicklung der Wasserspiegeldifferenzen entlang der Gewässerstrecken wird auf die nachfolgenden Längsprofildarstellungen verwiesen.

4.2.3 Wasserspiegellängsprofile

In Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4 sind die Wasserspiegellagen des Referenzszenarios SZ0 den Ergebnissen der Szenarien SZ1T bzw. SZ130 gegenübergestellt.

Abbildung 4-2 zeigt die in den Szenarien erreichte Wasserspiegelabsenkung im EUK von bis zu 37 cm (SZ1T) bzw. 76 cm (SZ130). im Bereich der Haberlandbrücke. Im weiteren Verlauf sind die reduzierten bzw. bereichsweise auch erhöhten Wasserspiegellagen erkennbar. Siginifikant ist die Aufstauerscheinung am Auslauf des EUK im Szenario SZ130 im Übergangsbereich zu den ursprünglichen Strömungsverhältnissen.

Aus Abbildung 4-3 geht hervor, dass die Wasserspiegellagen in der Alten Elbe durchschnittlich ca. 2 cm (SZ1T) bzw. 6 cm (SZ130) niedriger sind als der Referenzwasserspiegel.

In der Stromelbe ergeben sich durchschnittliche Reduzierungen von ca. 2 cm (SZ1T) bzw. 8 cm (SZ130) mit maximalen Beträgen (ca. 4 cm bzw. 12 cm) am Elbe-km 301 und am Elbe-km 309 (Abbildung 4-4).

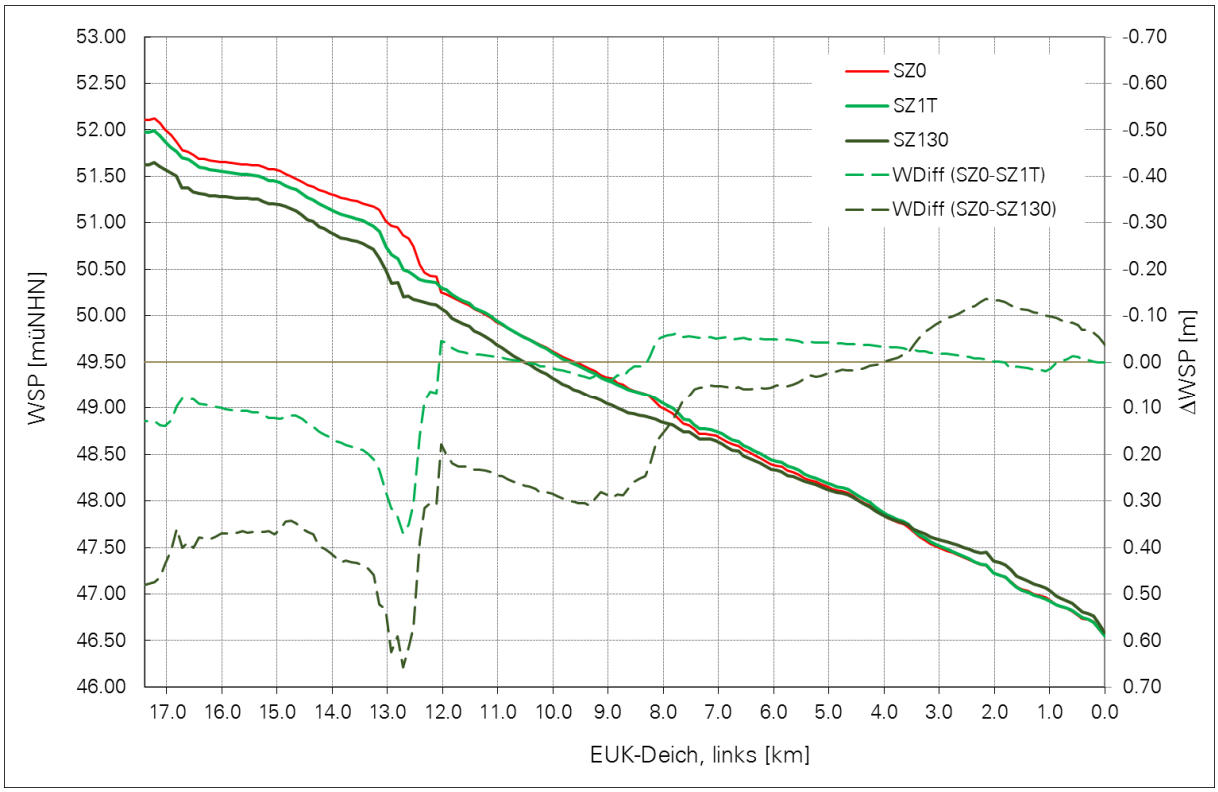


Abbildung 4-2 – Wasserspiegellängsprofile EUK (Q=5090 m³/s, stationär; SZ0, SZ1T, SZ130)

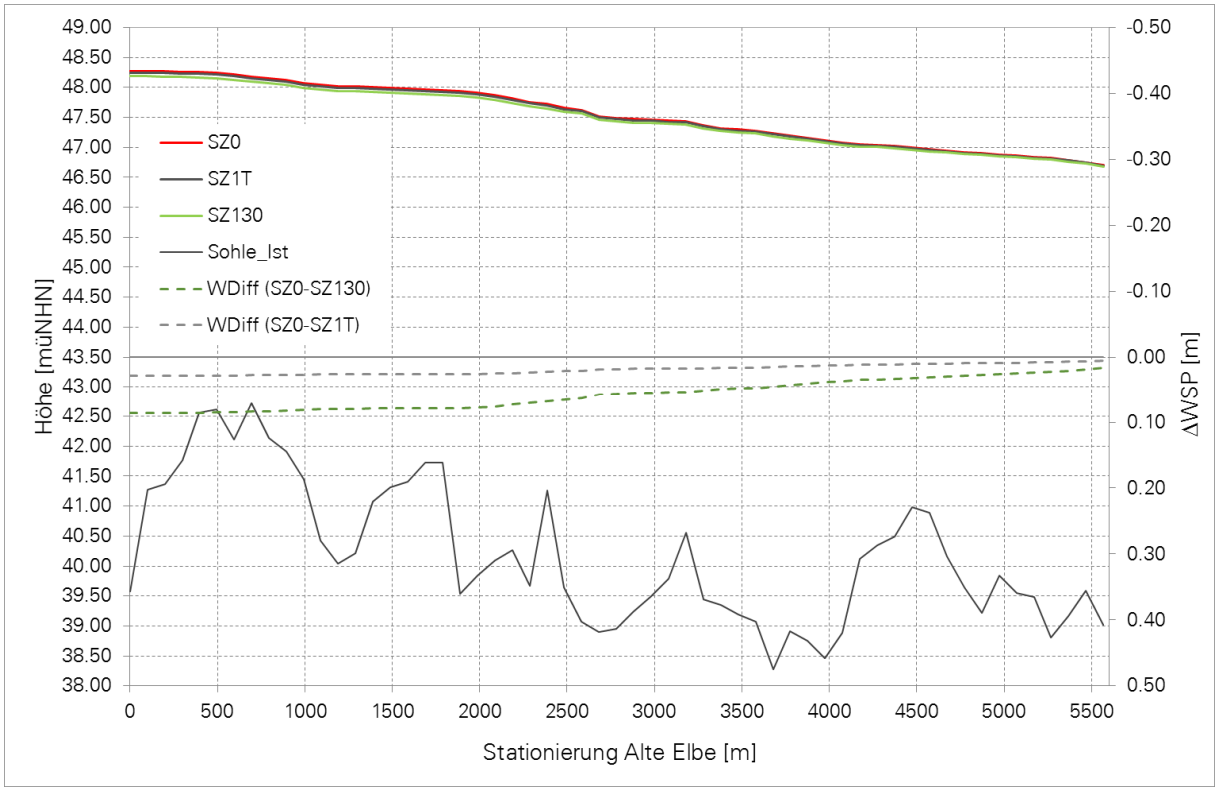


Abbildung 4-3 – Wasserspiegellängsprofile Alte Elbe (Q=5090 m³/s, stationär; SZ0, SZ1T, SZ130)

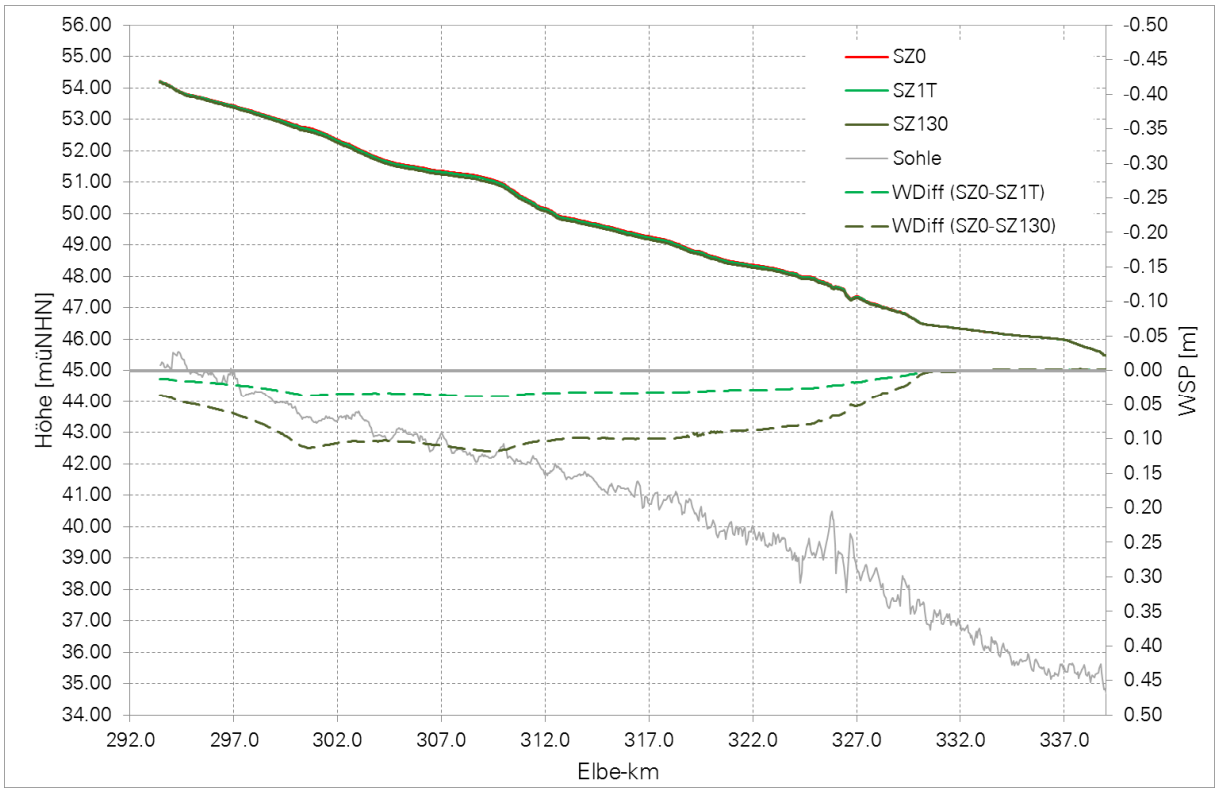


Abbildung 4-4 – Wasserspiegellängsprofile Stromelbe (Q=5090 m³/s, stationär; SZ0, SZ1T, SZ130)

4.3 SZENARIO 2

4.3.1 Abflussaufteilung

Tabelle 4-2 enthält eine Gegenüberstellung der Abflussaufteilungen zum Zeitpunkt des Scheitelabflusses für die Szenarien SZ2_1-1 (Öffnung bei 1580 m³/s, 06.06.2013, 0:15 Uhr) und SZ2_1-2 (Öffnung bei 1780 m³/s, 06.06.2013, 15:15 Uhr) für die instationäre Simulation des HW 2013 (Q_{max}=5090 m³/s). Daraus geht hervor, dass die Scheitelabflüsse in den Teilgewässerstrecken durch die frühere Öffnung nur marginal (Zehntelbereich) beeinflusst werden.

Tabelle 4-2 – Vergleich der Abflussaufteilung in Messungen und in Szenarien SZ2_1-1 bzw. SZ2_1-2

Abfluss		LHW		BfG	Simulation	
		08.06.2013	09.06.2013	09.06.2013	SZ2_1-1	SZ2_1-2
Q_{Ges}	[m³/s]	4955	5034	5146	5090	5090
	[%]	100	100	100	100	100
Q_{EUK}	[m³/s]	1290	1272	1259	1231	1231
	[%]	26,0	25,3	24,5	24,2	24,2
$Q_{Stadtstrecke}$	[m³/s]	3665	3762	3887	3859	3859
	[%]	74,0	74,7	75,5	75,8	75,8
$Q_{Stromelbe}$	[m³/s]	1976	2049	-	1928	1928
	[%]	39,9	40,7	-	37,9	37,9
$Q_{Alte\ Elbe}$	[m³/s]	1426	1434	1687	1586	1586
	[%]	28,0	28,2	33,1	31,2	31,2
Q_{Rest}	[m³/s]				345	345
	[%]				6,7	6,7

Da die berechneten Wasserspiegellagen für beide Szenarien annähernd identisch sind, wird auf die Differenzendarstellungen an dieser Stelle verzichtet. Es kann somit konstatiert werden, dass durch eine vorzeitige Wehröffnung keine Reduzierung der Scheitelwerte (Abflüsse, Wasserstände) erreicht werden kann. Somit entspricht die aktuell gültige Wehröffnungsvorschrift, die vor dem Hintergrund notwendiger Straßensperrungen bzw. der Gefahr des Überströmens der Wehrtafeln auf einen möglichst späten Öffnungszeitpunkt ausgelegt ist (vgl. HORLACHER, HEYER & MÖRICKE, 2002), den aktuellen Erfordernissen.

4.4 SZENARIO 3 UND 3S

4.4.1 Abflussaufteilung

Tabelle 4-3 enthält eine Gegenüberstellung der Abflussaufteilungen für die Szenarien SZ3 und SZ3S (Q=5090 m³/s, stationär).

Tabelle 4-3 –Abflussaufteilung in Messungen und in Szenario SZ3 bzw. SZ3S

Abfluss		LHW		BfG	Simulation		
		08.06.2013	09.06.2013	09.06.2013	SZ0	SZ3	SZ3S
Q_{Ges}	[m³/s]	4955	5034	5146	5090	5090	5090
	[%]	100	100	100	100	100	100
Q_{EUK}	[m³/s]	1290	1272	1259	1235	1233	1231
	[%]	26,0	25,3	24,5	24,3	24,2	24,2
$Q_{Stadtstrecke}$	[m³/s]	3665	3762	3887	3855	3857	3859
	[%]	74,0	74,7	75,5	75,7	75,8	75,8
$Q_{Stromelbe}$	[m³/s]	1976	2049	-	1931	1796	1694
	[%]	39,9	40,7	-	37,9	35,3	33,3
$Q_{Alte\ Elbe}$	[m³/s]	1426	1434	1687	1594	1777	1897
	[%]	28,0	28,2	33,1	31,3	34,9	37,3
Q_{Rest}	[m³/s]	263	280	-	330	284	267
	[%]	5,3	5,5	-	6,5	5,6	5,2

Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass die vorgenommenen Änderungen in beiden Szenarien keine wesentlichen Auswirkungen auf die Abflussaufteilung zwischen EUK und Stadtstrecke besitzen ($\Delta Q < 4$ m³/s). Jedoch führt die geänderte Bewuchssituation, die eine Reduzierung der Fließwiderstände in der Alten Elbe bewirkt, zu einer geänderten Abflussaufteilung im Stadtgebiet Magdeburgs, so dass nunmehr die Alte Elbe stärker beaufschlagt wird (34,9%) als im Referenzzustand (31,3%). Diese Tendenz wird durch die im Szenario SZ3S modellierte Umprofilierung der Alten Elbe zusätzlich verstärkt, weshalb in diesem Fall der Abfluss über die Alte Elbe sogar größer ist (37,3%) als der Teilabfluss der Stromelbe (33,3%). Die aktuell bei Extremhochwasser vorhandene Abflussaufteilung über Stromelbe und Alte Elbe würde somit annähernd umgekehrt werden.

4.4.2 Wasserspiegeldifferenzen

In Abbildung 4-5 sind die Wasserspiegeldifferenzen im gesamten Modellgebiet für die Szenarien SZ3 und SZ3S dargestellt.

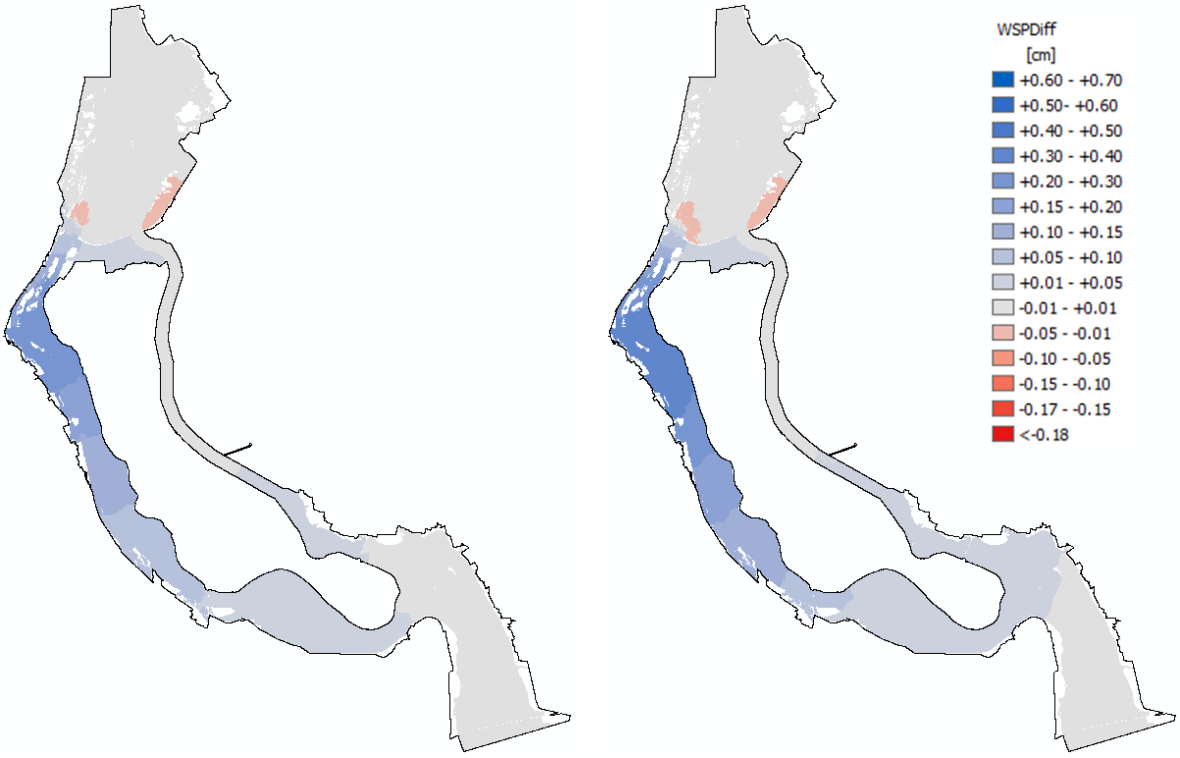


Abbildung 4-5 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) der Szenarien SZ3 (links) und SZ3S (rechts) mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk)

Aus den Abbildungen geht hervor, dass die modellierte Bewuchsreduzierung in der Alten Elbe in beiden Szenarien zu deutlich reduzierten Wasserspiegellagen im unmittelbaren Verzweigungsbereich Stromelbe/Alte Elbe führt. Diese wirken sich auch auf die Wasserspiegellagen oberstrom (bis ca. Abzweig EUK) und unterstrom (bis Bereich Herrenkrug) aus. Auf die errechneten Beträge wird anhand der Wasserspiegellängsprofile näher eingegangen. Zu erkennen sind jedoch auch Gebiete, in denen die Veränderungen zu einer Erhöhung von < 2 cm (Bereich Magdeburg, Schleusenkanal) bzw. < 3 cm (Bereich Biederitz) der Wasserspiegellagen führen.

4.4.3 Wasserspiegellängsprofile

In nachfolgenden Abbildungen sind die Wasserspiegellagen des Referenzszenarios SZ0 den Ergebnissen der Szenarien SZ3 bzw. SZ3S gegenübergestellt.

Abbildung 4-6 veranschaulicht die nur geringfügige Wasserspiegelabsenkung im EUK von ca. 1-3 cm oberhalb des Deich-km10,0. Die Auswirkungen der Maßnahme auf die hydraulischen Verhältnisse im EUK sind somit gering.

Aus Abbildung 4-7 geht hervor, dass die Wasserspiegellagen in der Alten Elbe am Abzweig von der Stromelbe durchschnittlich ca. 22-25 cm (SZ3) bzw. 35-38 cm (SZ3S) niedriger sind als der Referenzwasserspiegel. Diese Differenz baut sich im weiteren Verlauf relativ gleichmäßig ab, so dass am Einmündungsbereich in die Stromelbe die Referenzwerte wieder erreicht werden. Der modellierte Sohlabtrag in der Alten Elbe bewirkt einen zusätzlichen Effekt zur Bewuchsreduzierung, so dass der Wasserspiegel z. B. am Ausmündungsbereich (Station 0) ca. 15 cm und im Bereich des „Kleinen Wasserfalls“ (Station 3200) um ca. 7 cm unterhalb der Wasserspiegellage des Szenarios SZ3 liegt.

Für die Stromelbe ergeben sich für beide Szenarien niedrigere Wasserspiegellagen (Schwellwert: 1 cm) im Bereich von Elbe-km 301,5-329,5 (SZ3S) bzw. 299-329,5 (SZ3S), wobei maximale Reduzierungen von 22 cm (SZ3) bzw. 35 cm (SZ3S) am Elbe-km 323

ermittelt werden. Geringfügige Wasserspiegelanhebungen bis max. 2 cm ergeben sich im Bereich Elbe-km 329,5-331 (Abbildung 4-8).

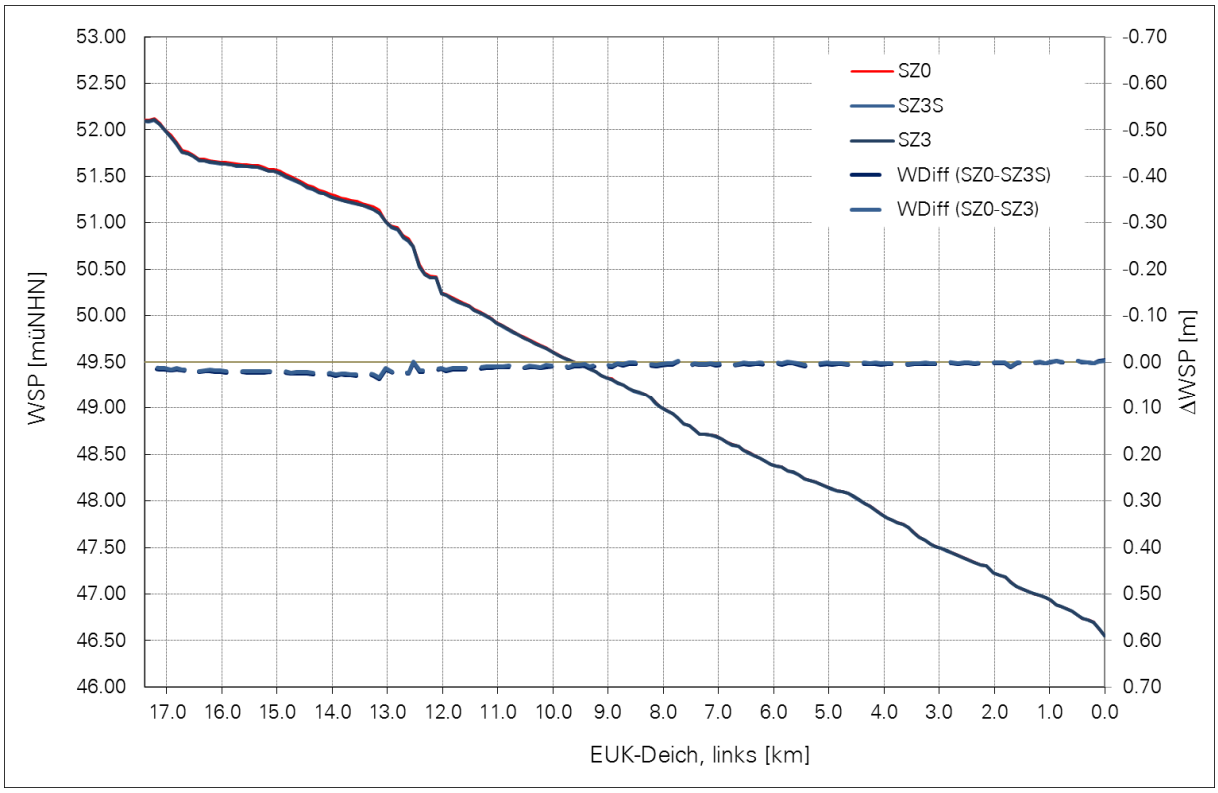


Abbildung 4-6 – Wasserspiegellängsprofil EUK (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ3 und SZ3S)

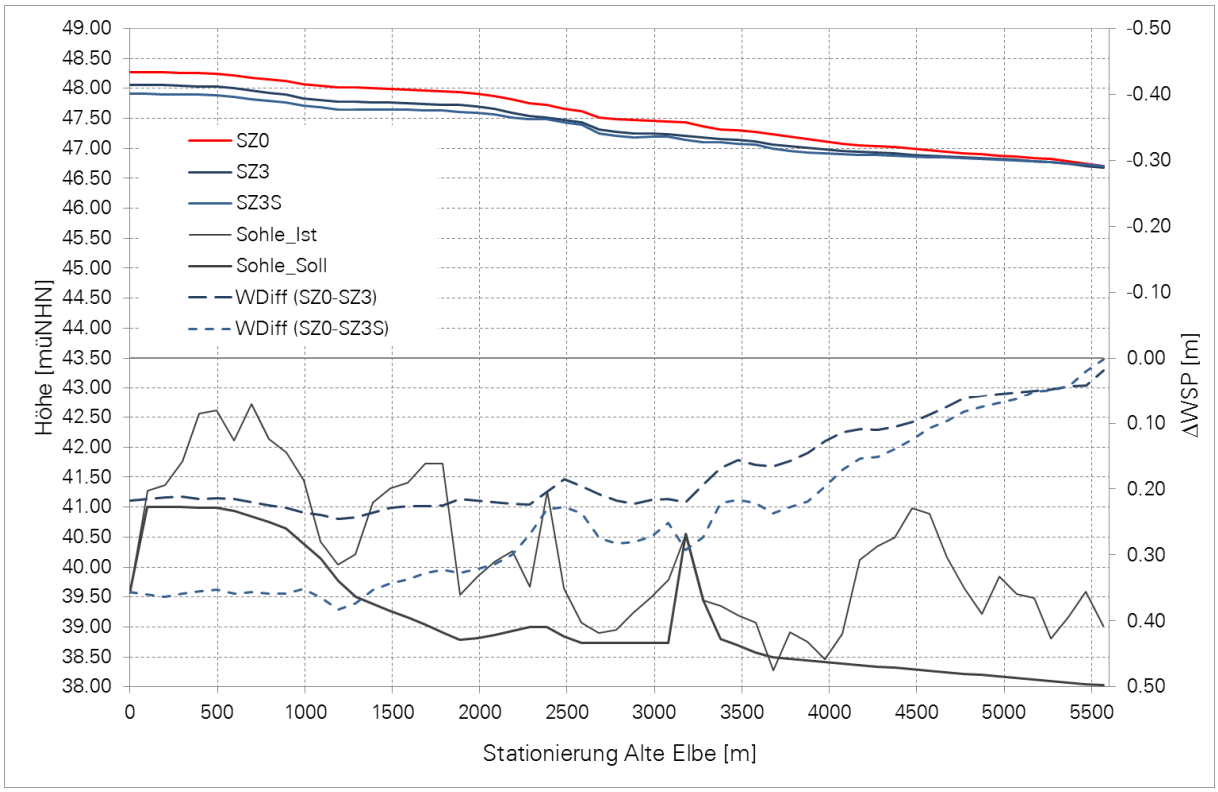


Abbildung 4-7 – Wasserspiegellängsprofil Alte Elbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ3 und SZ3S)

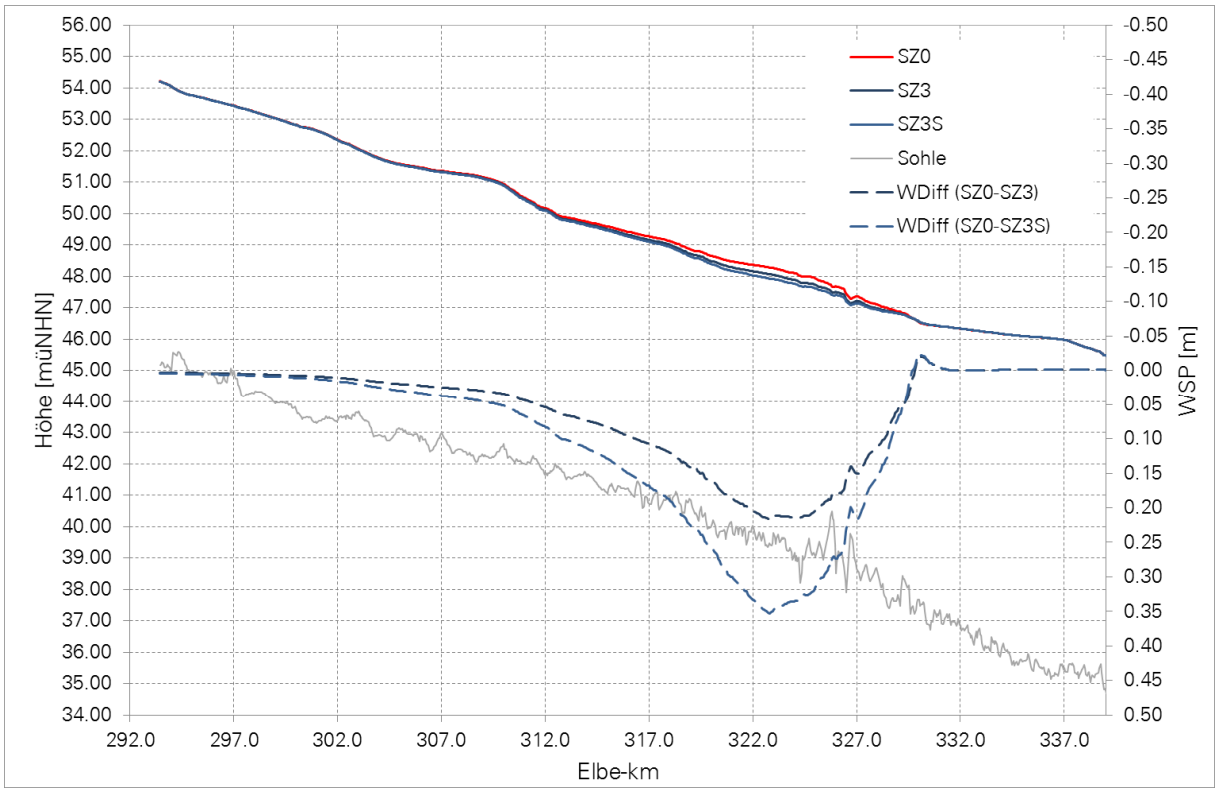


Abbildung 4-8 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ3 und SZ3S)

4.5 SZENARIO 4, 4S UND 4SF

4.5.1 Abflussaufteilung

Tabelle 4-4 enthält eine Gegenüberstellung der Abflussaufteilungen für die Szenarien SZ4, SZ4S und SZ4SF.

Tabelle 4-4 –Abflussaufteilung in Messungen und in Szenario SZ4, SZ4S und SZ4SF

Abfluss		LHW 09.06.2013	BfG 09.06.2013	Simulation SZ0	SZ4	SZ4S	SZ4SF
Q_{Ges}	[m³/s]	5034	5146	5090	5090	5090	5090
	[%]	100	100	100	100	100	100
Q_{EUK}	[m³/s]	1272	1259	1235	1235	1233	1232
	[%]	25,3	24,5	24,3	24,3	24,2	24,2
$Q_{Stadtstrecke}$	[m³/s]	3762	3887	3855	3855	3857	3858
	[%]	74,7	75,5	75,7	75,7	75,8	75,8
$Q_{Stromelbe}$	[m³/s]	2049	-	1931	1930	1763	1743
	[%]	40,7	-	37,9	37,9	34,6	34,2
$Q_{Alte\ Elbe}$	[m³/s]	1434	1687	1594	1595	1801	1829
	[%]	28,2	33,1	31,3	31,3	35,4	35,9
Q_{Rest}	[m³/s]	280	-	330	330	293	286
	[%]	5,5	-	6,5	6,5	5,8	5,6

Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass die vorgenommenen Änderungen in allen drei Szenarien keine wesentlichen Auswirkungen auf die Abflussaufteilung zwischen EUK und Stadtstrecke besitzen ($\Delta Q < 3$ m³/s).

Die alleinige Herausnahme des Cracauer Wehrs (SZ4) hat keinen Effekt auf die Abflussaufteilung im Stadtgebiet Magdeburgs. Diese ändert sich jedoch maßgeblich durch die zusätzlich vorgenommenen Umprofilierungen in der Alten Elbe, so dass in den Szenarien SZ4S und SZ4SF die Teilabflüsse der Alten Elbe nun größer sind (35,4 bzw. 35,9%) als in der Stromelbe (34,6 bzw. 34,2%). Die Umverteilung der Abflüsse fällt jedoch etwas geringer aus als im Szenario SZ3S (vgl. Tabelle 4-3, S. 26).

4.5.2 Wasserspiegeldifferenzen

In Abbildung 4-9 sind die Wasserspiegeldifferenzen im gesamten Modellgebiet für die Szenarien SZ4S und SZ4SF dargestellt. Da sich im Szenario SF4 keine nennenswerten Veränderungen in der Hydraulik ergeben, wird auf eine entsprechende Differenzendarstellung an dieser Stelle verzichtet.

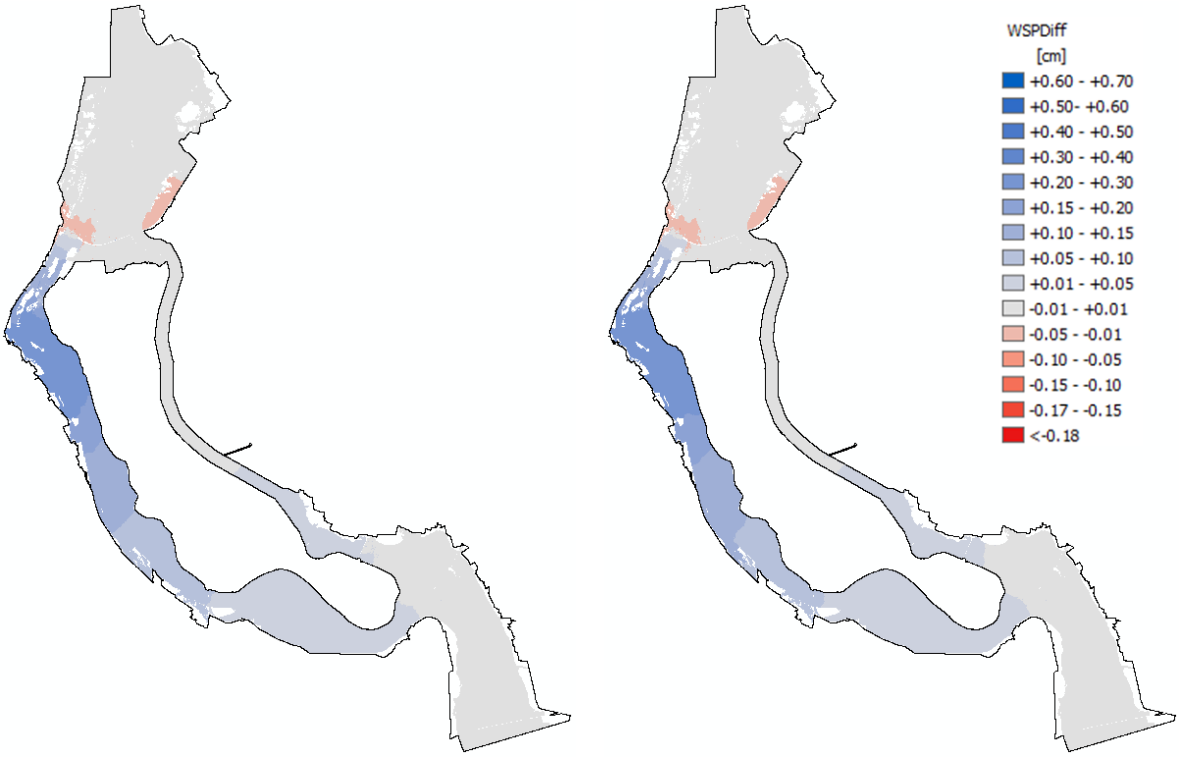


Abbildung 4-9 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) der Szenarien SZ4S (links) und SZ4SF (rechts) mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk)

Aus den Abbildungen geht hervor, dass die modellierten Szenarien zu deutlich reduzierten Wasserspiegellagen im unmittelbaren Verzweigungsbereich Stromelbe/Alte Elbe führen. Diese wirken sich auch auf die Wasserspiegellagen oberstrom (bis ca. Abzweig EUK) und unterstrom (bis Bereich Herrenkrug) aus. Auf die errechneten Beträge wird anhand der Wasserspiegellängsprofile näher eingegangen. Zu erkennen sind auch in diesen Szenarien Gebiete, in denen die Veränderungen zu einer Erhöhung von < 4 cm (Bereich Einfahrt Handelshafen, unterhalb Bahnbrücke; Bereich Biederitz) der Wasserspiegellagen führen.

4.5.3 Wasserspiegellängsprofile

In nachfolgenden Abbildungen sind die Wasserspiegellagen des Referenzszenarios SZ0 den Ergebnissen der Szenarien SZ4, SZ4S bzw. SZ4SF gegenübergestellt. In allen Diagrammen

ist zu erkennen, dass der alleinige Rückbau des Cracauer Wehrs keinen Effekt auf die hydraulischen Verhältnisse im extremen Hochwasserfall besitzt.

Abbildung 4-10 veranschaulicht die nur geringfügige Wasserspiegelabsenkung im EUK in den Szenarien SZ4S und SZ4SF von ca. 1-3 cm oberhalb des Deich-km10,0. Die Auswirkungen der Maßnahmen auf die hydraulischen Verhältnisse im EUK sind somit gering.

Aus Abbildung 4-11 geht hervor, dass die Wasserspiegellagen in der Alten Elbe am Abzweig von der Stromelbe durchschnittlich ca. 25 cm (SZ4S) bzw. 27 cm (SZ4SF) niedriger sind als der Referenzwasserspiegel. Diese Differenz baut sich im weiteren Verlauf relativ gleichmäßig ab. In den Szenarien SZ4S und SZ4SF ergeben sich am Einmündungsbereich in die Stromelbe um ca. 4 cm höhere Wasserstände als im Referenzzustand. Der modellierte Abtrag des „Kleinen Wasserfalls" (SZ4SF) in der Alten Elbe bewirkt einen zusätzlichen Effekt zum Sedimentabtrag, so dass der Wasserspiegel oberhalb des „Kleinen Wasserfalls" um durchschnittlich 2 cm unterhalb der Wasserspiegellage des Szenarios SZ4S liegt.

Für die Stromelbe ergeben sich für die Szenarien SZ4S und SZ4SF niedrigere Wasserspiegellagen (Schwellwert: 1 cm) im Bereich von Elbe-km 301,0-329,0 (SZ4S) bzw. 300,5-329,0 (SZ4SF), wobei maximale Reduzierungen von 24 cm (SZ4S) bzw. 26 cm (SZ4SF) am Elbe-km 323 ermittelt werden. Geringfügige Wasserspiegelanhebungen bis max. 4 cm ergeben sich im Bereich Elbe-km 329,5-330 (Abbildung 4-12).

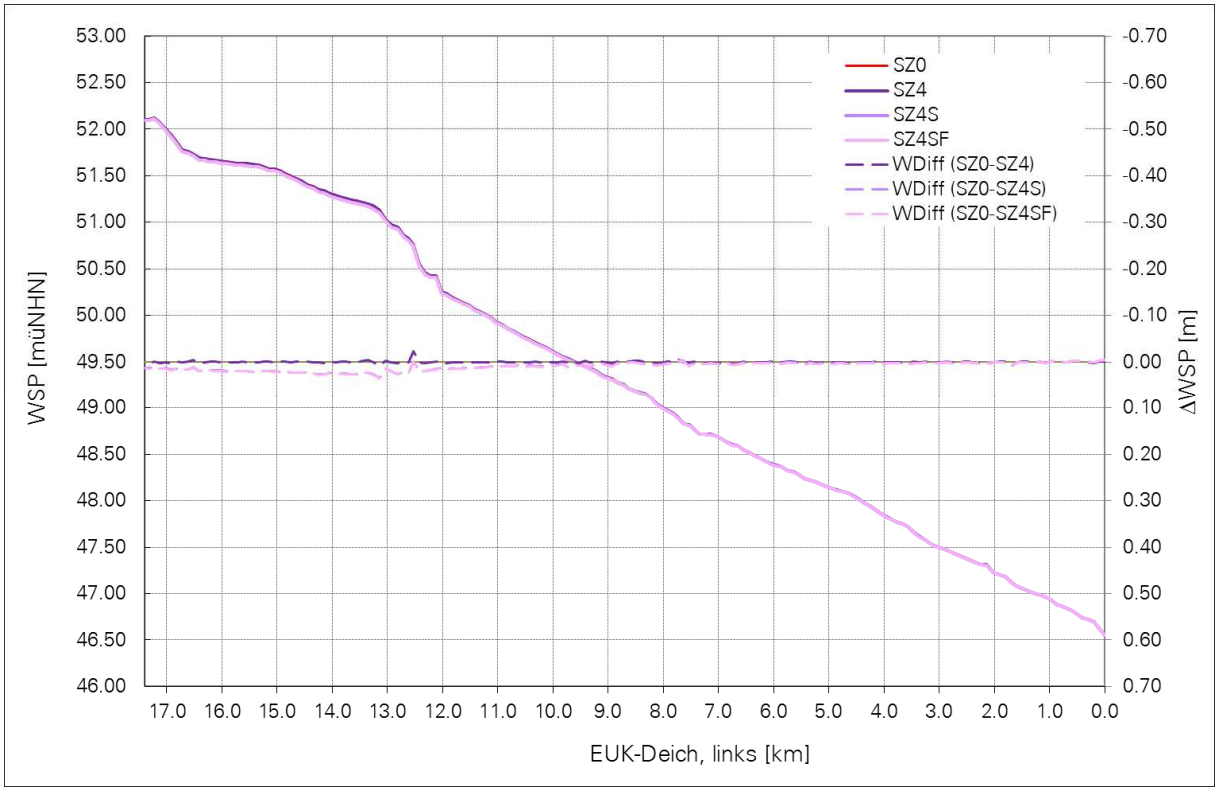


Abbildung 4-10 – Wasserspiegellängsprofil EUK (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ4, SZ4S und SZ4SF)

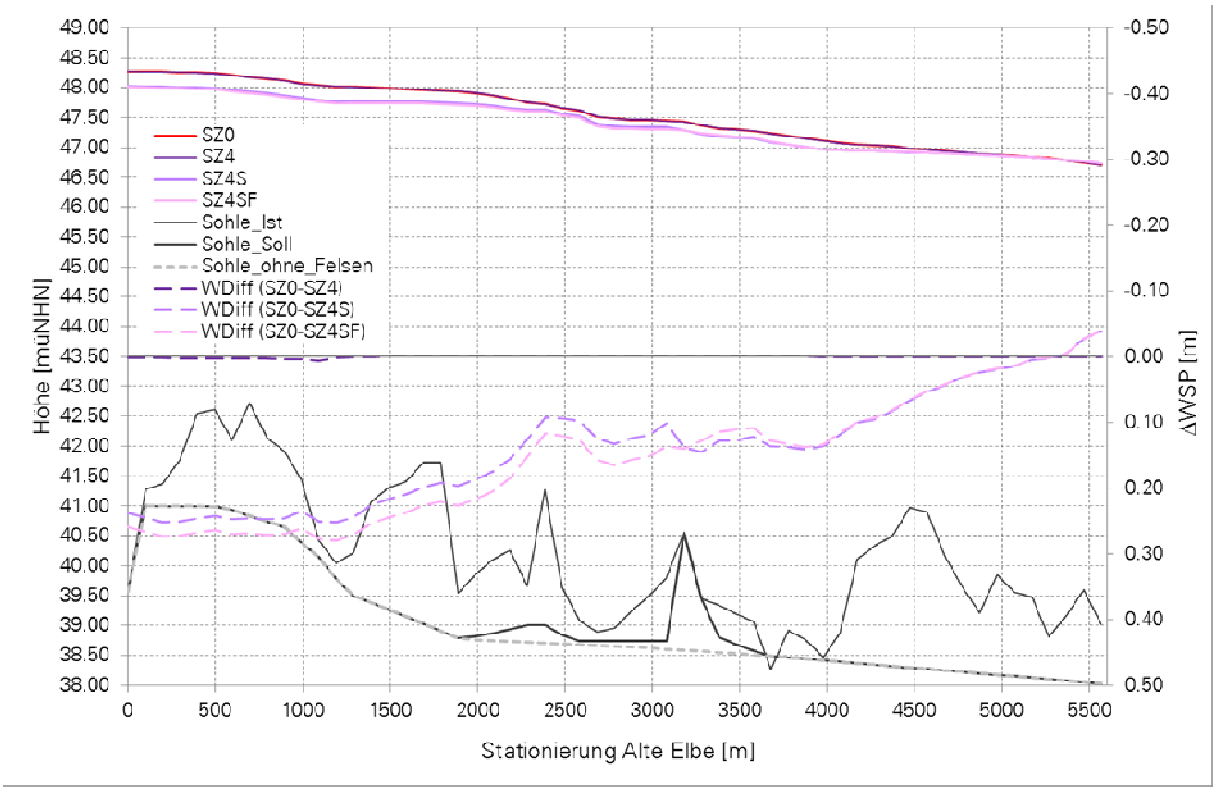


Abbildung 4-11 – Wasserspiegellängsprofil Alte Elbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ4, SZ4S und SZ4SF)

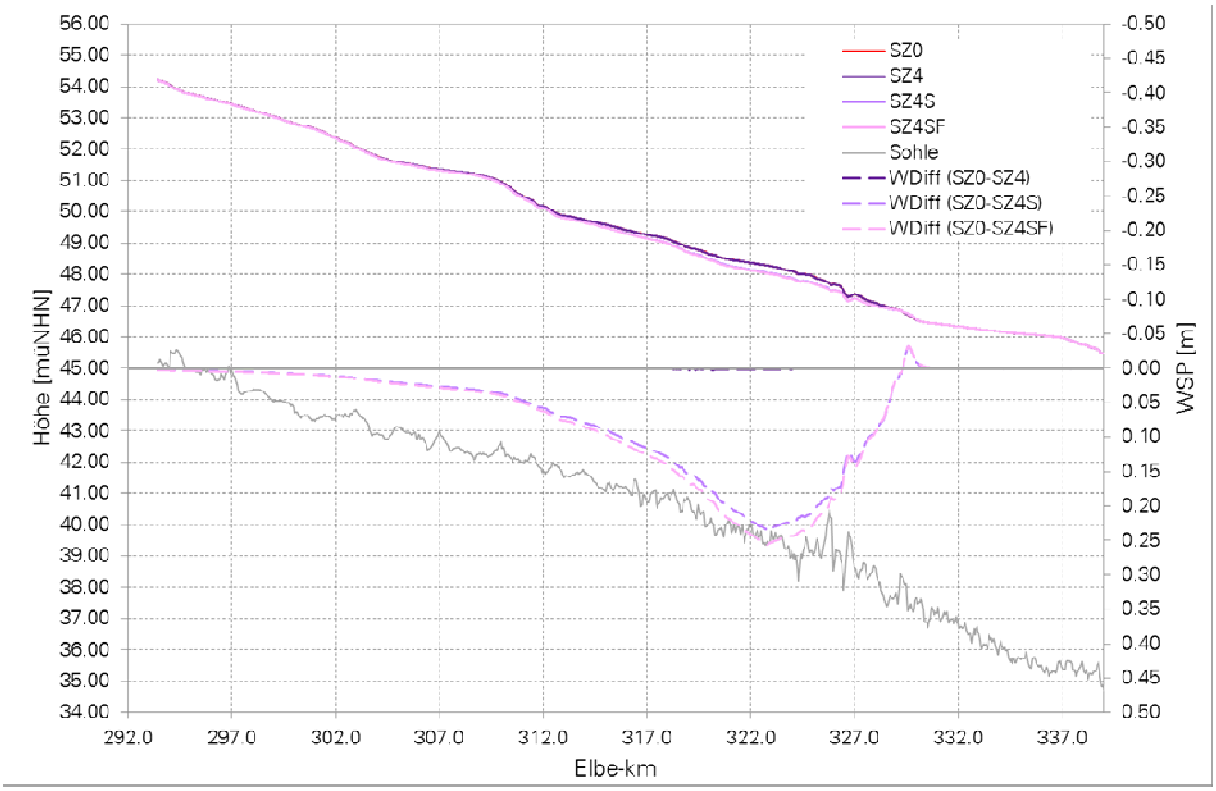


Abbildung 4-12 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ4, SZ4S und SZ4SF)

4.6 SZENARIO 5

4.6.1 Abflussaufteilung

Tabelle 4-5 enthält eine Gegenüberstellung der Abflussaufteilungen für die Messungen sowie die Szenarien SZ0 und SZ5.

Tabelle 4-5 – Vergleich der Abflussaufteilung in Messungen und in Szenarien SZ0 bzw. SZ5

Abfluss		LHW		BfG	Simulation	
		08.06.2013	09.06.2013	09.06.2013	SZ0	SZ5
Q_{Ges}	[m³/s]	4955	5034	5146	5090	5090
	[%]	100	100	100	100	100
Q_{EUK}	[m³/s]	1290	1272	1259	1235	1235
	[%]	26,0	25,3	24,5	24,3	24,3
$Q_{Stadtstrecke}$	[m³/s]	3665	3762	3887	3855	3855
	[%]	74,0	74,7	75,5	75,7	75,7
$Q_{Stromelbe}$	[m³/s]	1976	2049	-	1931	1917
	[%]	39,9	40,7	-	37,9	37,7
$Q_{Alte\ Elbe}$	[m³/s]	1426	1434	1687	1594	1612
	[%]	28,0	28,2	33,1	31,3	31,7
Q_{Rest}	[m³/s]				330	326
	[%]				6,5	6,4

Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass die im Szenario SZ5 vorgenommenen Änderungen keine Auswirkungen auf die Abflussaufteilung zwischen EUK und Stadtstrecke besitzen.

Jedoch führt der Rückbau der Kanonenbahnbrücke in der Alten Elbe zu einer geänderten Abflussaufteilung im Stadtgebiet Magdeburgs, so dass die Alte Elbe geringfügig stärker beaufschlagt wird (31,7%) als im Referenzzustand (31,3%). Dadurch verringert sich der Teilabfluss in der Stromelbe marginal um 0,2% sowie in den restlichen Fließstrecken (inkl. Zollelbe) um 0,1%.

4.6.2 Wasserspiegeldifferenzen

In Abbildung 4-9 sind die Wasserspiegeldifferenzen im gesamten Modellgebiet für das Szenario SZ5 dargestellt.

Die Herausnahme der Kanonenbahnbrücken ergibt für den Bereich oberhalb der Brücke über die Alte Elbe sowie einen Bereich oberhalb der Brücke über den EUK geringfügig niedrigere Wasserspiegellagen. Unmittelbar unterhalb beider Brücken werden bereichsweise marginal höhere Werte errechnet (Abbildung 4-14). Auf die betraglichen Veränderungen wird anhand der Wasserspiegellängsprofile näher eingegangen.

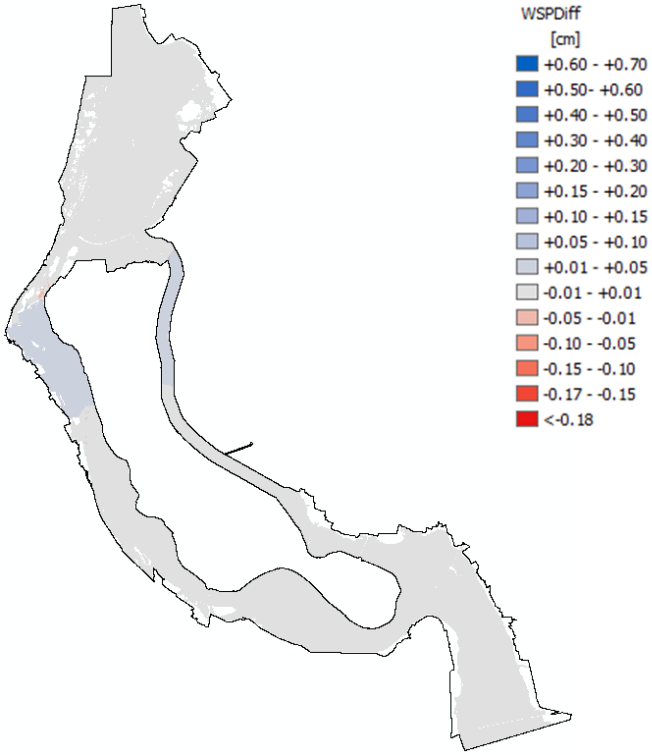


Abbildung 4-13 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) im Szenario SZ5 (links) mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk)

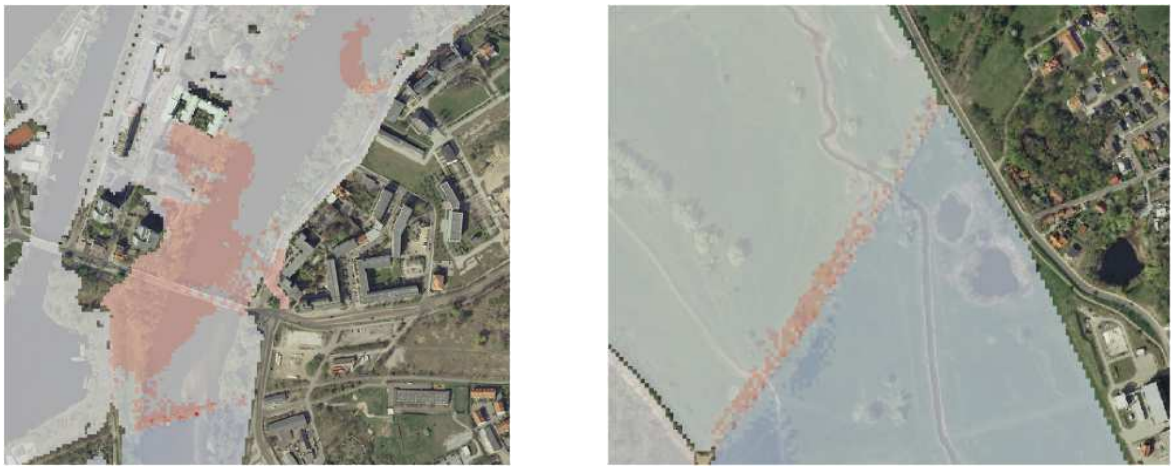


Abbildung 4-14 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) im Szenario SZ5 (links) im unmittelbaren Brückenbereich in der Alten Elbe (links) und im EUK (rechts) (rot – Anhebung, blau – Absunk)

4.6.3 Wasserspiegellängsprofile

In nachfolgenden Abbildungen sind die Wasserspiegellagen des Referenzszenarios SZ0 dem Ergebnis des Szenarios SZ5 gegenübergestellt.

Abbildung 4-15 veranschaulicht die Wasserspiegelabsenkung im EUK von bis zu 6 cm im unmittelbaren Oberwasser der Kanonenbahnbrücke. Diese Differenz baut sich bis ca. Deich-km 6,5 gleichmäßig ab (Schwellwert: 1 cm).

Aus Abbildung 4-16 geht hervor, dass die Wasserspiegellage unmittelbar oberhalb der Kanonenbahn in der Alten Elbe nach deren Rückbau um ca. 3 cm niedriger ist als im Referenzzustand. Dieser Reduzierung wirkt sich nach Oberwasser aus, so dass im

Ausmündungsbereich von der Stromelbe noch eine Reduzierung um 1 cm ausgewiesen wird. Im Unterwasser der Kanonenbahnbrücke ergibt sich ein geringfügiger Aufstau um 1 cm, der sich bis zur Station 4500 gleichmäßig abbaut, so dass an der Einmündung in die Stromelbe die Referenzwerte wieder erreicht werden.

Für die Stromelbe ergibt sich für das Szenario SZ5 eine geringfügig niedrigere Wasserspiegellage von max. 1 cm im Bereich von Elbe-km 319,5-326,0, wobei der Maximalwert der Reduzierung am Elbe-km 324 ermittelt wird.

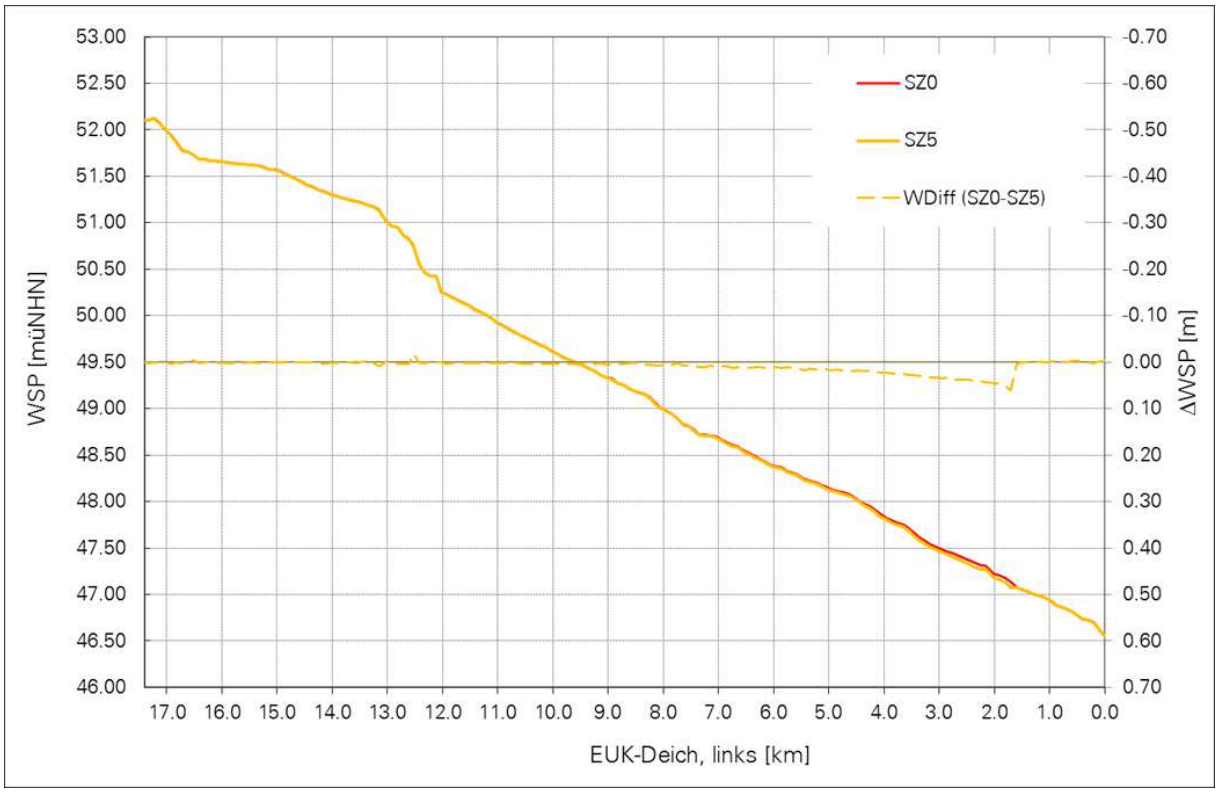


Abbildung 4-15 – Wasserspiegellängsprofil EUK (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ5)

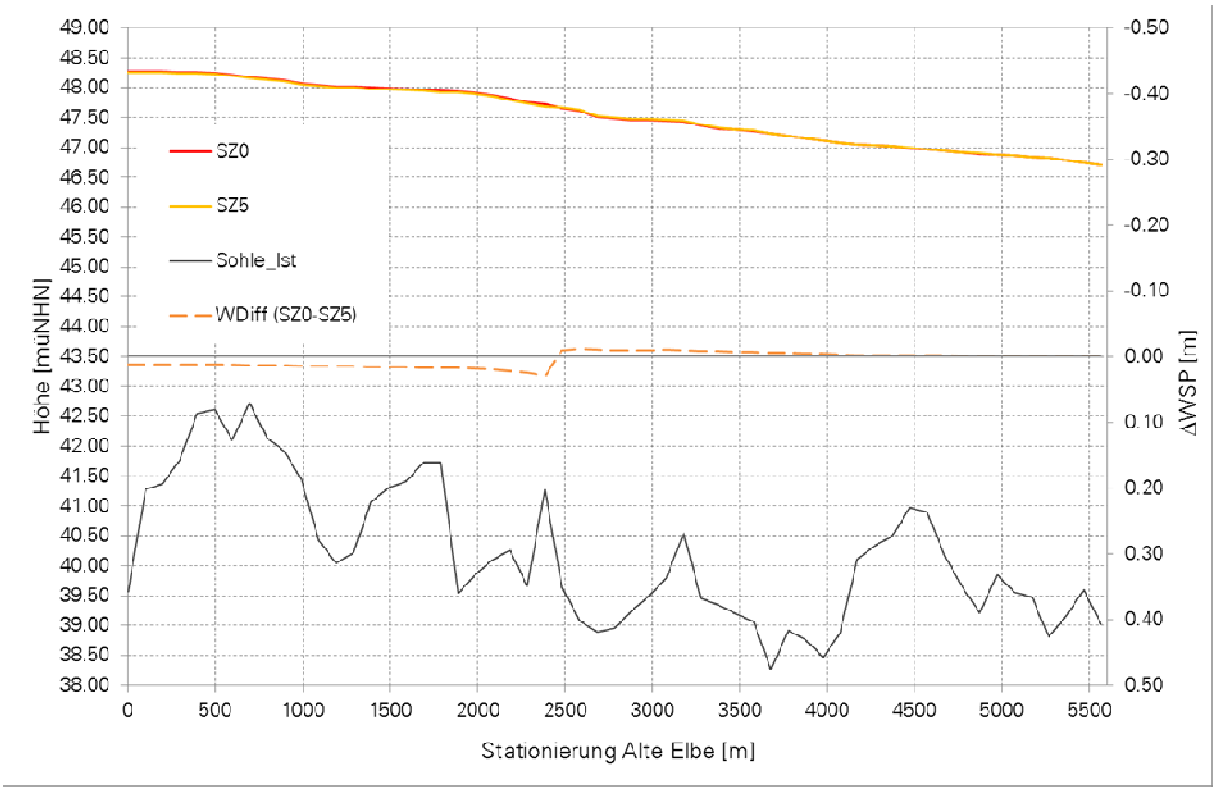


Abbildung 4-16 – Wasserspiegellängsprofil Alte Elbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ5)

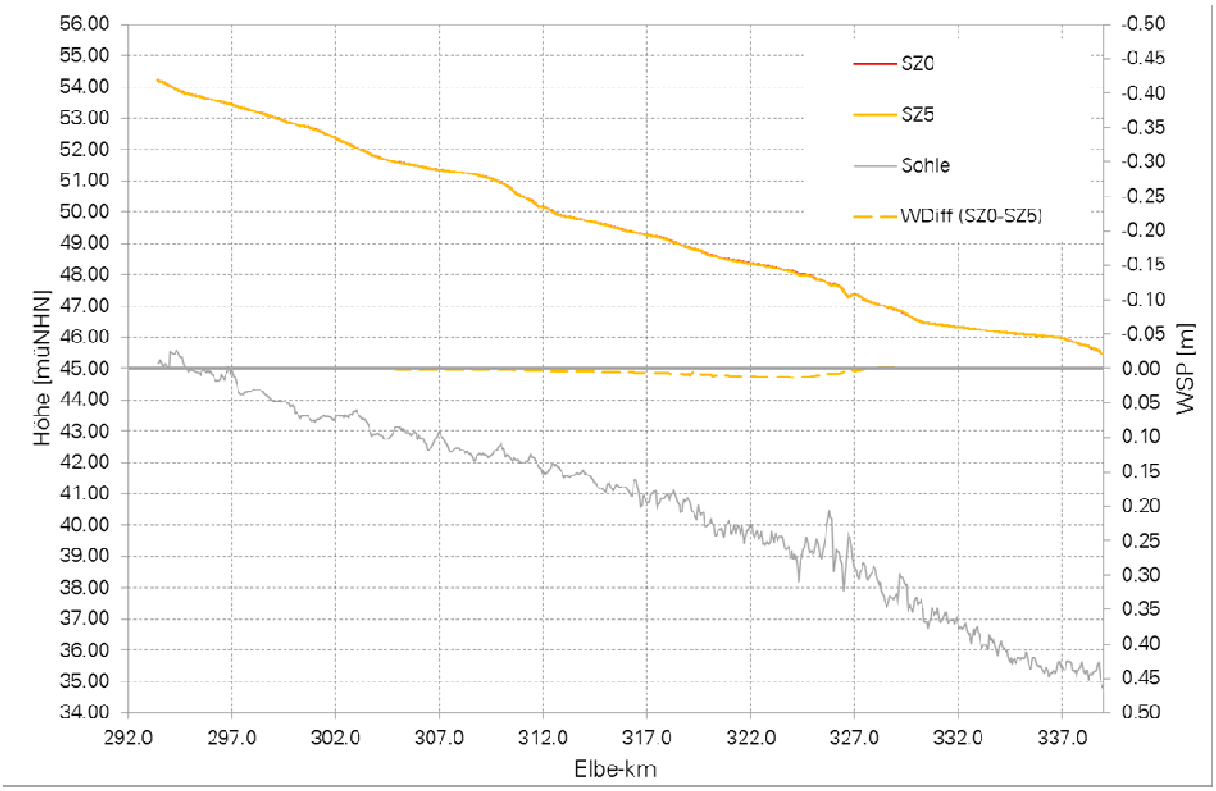


Abbildung 4-17 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ5)

4.7 SZENARIO 6

4.7.1 Abflussaufteilung

Tabelle 4-6 enthält eine Gegenüberstellung der Abflussaufteilungen für Szenario SZ6 (Q = 554 m³/s, stationär).

Tabelle 4-6 –Abflussaufteilung in Messungen und in Szenario SZ6

Abfluss		Simulation SZ6
Q_{Ges}	[m³/s]	554
	[%]	100
Q_{EUK}	[m³/s]	0
	[%]	0
$Q_{Stadtstrecke}$	[m³/s]	554
	[%]	100
$Q_{Stromelbe}$	[m³/s]	484
	[%]	87,4
$Q_{Alte\ Elbe}$	[m³/s]	69
	[%]	12,5
Q_{Rest}	[m³/s]	1
	[%]	0,1

In der Stadstrecke Magdeburg werden 484 m³/s (87,4%) des Gesamtabflusses über die Stromelbe und 69 (m³/s) über die Alte Elbe abgeführt. Der Teilabfluss in weiteren Gewässern (z. B. Taube Elbe) wurde hier nicht betrachtet.

Die ermittelte Abflussaufteilung wurde mit Informationen, die im Rahmen früherer Projekte dazu zusammengetragen worden sind (HORLACHER & HEYER, 2006), verglichen. Entsprechend der Angaben des LHW Magdeburg (Bereich Hydrologie) wurden bei einem Gesamtabfluss von Q = 560 m³/s Teilabflüsse von $Q_{Stromelbe}$ = 533,4 m³/s (95,2%) bzw. $Q_{AlteElbe}$ = 26,9 m³/s (4,8 %) gemessen, wobei der genaue Zeitpunkt der Messung nicht angegeben war. Somit würde das 2D-HN-Modell den Teilabfluss über die Alte Elbe etwas überschätzen.

4.7.2 Wasserspiegellängsprofil

Um die im Szenario SZ6 ermittelte Wasserspiegellage bewerten zu können, wurde eine Wasserspiegelfixierung, die durch die BAW am 22.04.2004 in der Stromelbe im Bereich Elbe-km 322-345 durchgeführt worden ist, herangezogen. Für den Bereich der Alten Elbe standen keine derartigen Vergleichswerte zur Verfügung.

Der mittlere Tagesabfluss zum Zeitpunkt der Messungen wurde mit Q = 525 m³/s angegeben und unterschreitet den Simulationsabfluss (Q = 554 m³/s) somit geringfügig. Mittelwasserfixierungen jüngeren Datums standen für die Untersuchungen nicht zur Verfügung. Abbildung 4-18 beinhaltet die Gegenüberstellung der fixierten und der im SZ6 ermittelten Wasserspiegellage.

Abbildung 4-18 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=554 m³/s, stationär, SZ6)

Aus der Abbildung geht hervor, dass die berechnete Wasserspiegellage qualitativ und quantiativ relativ gut mit der Messung übereinstimmt. Während sie zwischen Elbe-km 322-326 zunächst nur geringfügig von der gemessenen abweicht, liegt sie im weiteren Verlauf tendenziell über der fixierten Wasserspiegellage, wobei die mittlere Abweichung ungefähr mit 13 cm und die maximale mit ca. 30 cm (bei Elbe-km 331,5) angegeben werden kann.

Am Pegel Magdeburg-Strombrücke (Elbe-km 326,6) wurde am 22.04.2004 ein Wasserstand von 42,03 müNHN gemessen bzw. von 42,02 müNHN in der Simulation ermittelt. Entsprechend der Angaben in DGJ (2004), korrespondiert im Jahr 2004 ein Gesamtabfluss von Q=556 m³/s mit einem Wasserstand von 42,08 müNHN am Pegel Magdeburg-Strombrücke, so dass festgestellt werden kann, dass die Simulationsergebnisse des Szenario SZ6 in akzeptablen Grenzen liegen. Eine differenziertere Betrachtung bzw. Anpassung des Modellverhaltens in Niedrig- und Mittelwassersimulationen würde aktuellere Daten inklusive einer detaillierten räumlichen und zeitlichen Einordnung von gemessenen Größen (hydrologische, hydraulische, gewässermorphologische) erfordern.

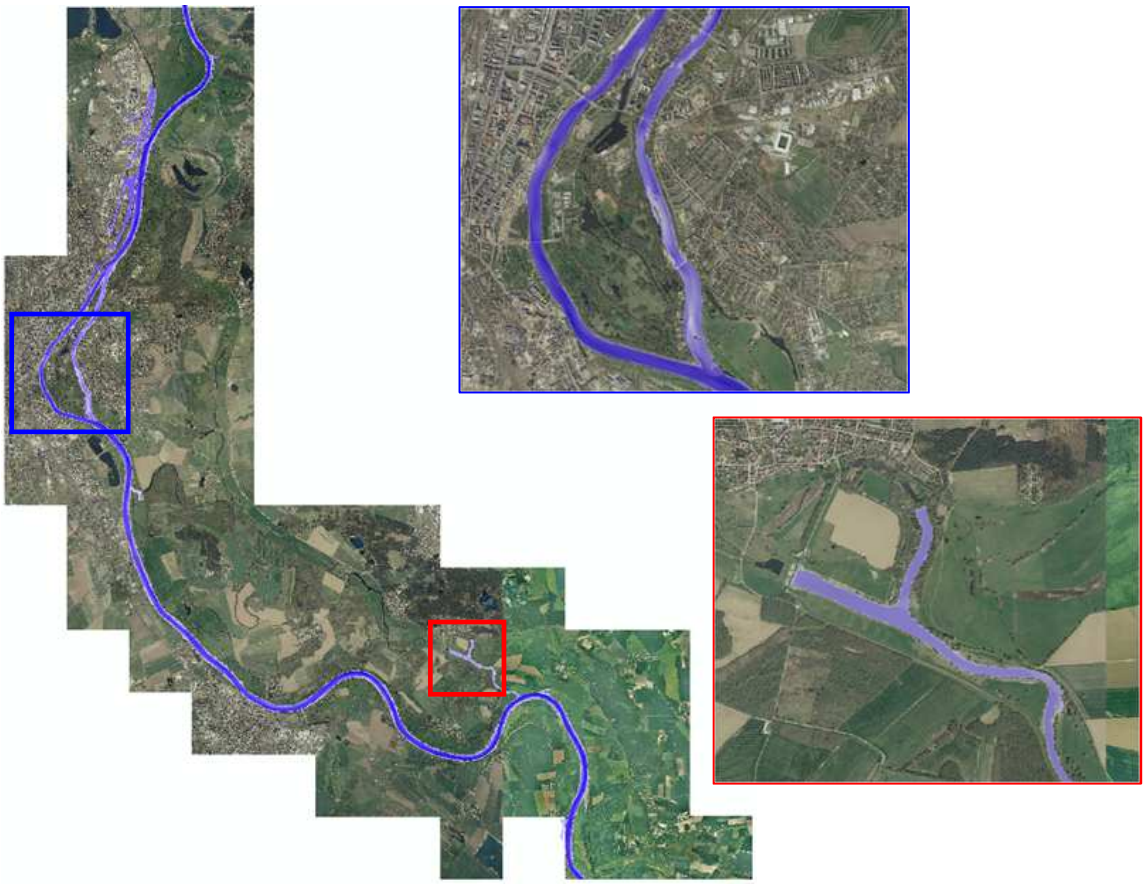


Abbildung 4-19 –Fließtiefendarstellung aus der MQ-Simulation des SZ6 (Q=554 m³/s)

4.8 SZENARIO 7

4.8.1 Abflussaufteilung

Tabelle 4-7 enthält eine Gegenüberstellung der Abflussaufteilungen für das Szenario SZ7.

Tabelle 4-7 – Vergleich der Abflussaufteilung in Messungen und in Szenarien SZ0 bzw. SZ7

Bereich		LHW		BfG	Simulation	
		08.06.2013	09.06.2013	09.06.2013	SZ0	SZ7
Q_{Ges}	[m³/s]	4955	5034	5146	5090	5090
	[%]	100	100	100	100	100
Q_{EUK}	[m³/s]	1290	1272	1259	1235	1366
	[%]	26,0	25,3	24,5	24,3	26,8
$Q_{Stadtstrecke}$	[m³/s]	3665	3762	3887	3855	3724
	[%]	74,0	74,7	75,5	75,7	73,2
$Q_{Stromelbe}$	[m³/s]	1976	2049	-	1931	1627
	[%]	39,9	40,7	-	37,9	32,0
$Q_{Alte\ Elbe}$	[m³/s]	1426	1434	1687	1594	1853
	[%]	28,0	28,2	33,1	31,3	36,4
Q_{Rest}	[m³/s]				330	244
	[%]				6,5	4,8

Die Ergebnisse zeigen, dass die vorgenommenen Anpassungen wesentliche Auswirkungen sowohl auf die Abflussaufteilung zwischen EUK und Stadtstrecke als auch zwischen der Stromelbe und der Alten Elbe im Stadtgebiet Magdeburgs haben würden. Die Steigerung des Teilabflusses über den EUK beträgt dabei ca. 2,5 % (+131 m³/s), während die Alte Elbe

mit einem um 5,1 % (+259 m³/s) erhöhten Abfluss beaufschlagt werden würde. Damit verbunden ergeben sich Abflussreduzierungen für die Stadtstrecke bzw. für die Stromelbe und die sonstigen Fließstrecken (inkl. Zollelbe) im Stadtgebiet Magdeburgs. Die Alte Elbe würde entgegen der aktuellen Situation den größten Teil des Hochwasserabflusses ableiten.

4.8.2 Wasserspiegeldifferenzen

In Abbildung 4-20 sind die Wasserspiegeldifferenzen im gesamten Modellgebiet für das Szenario SZ7 dargestellt.

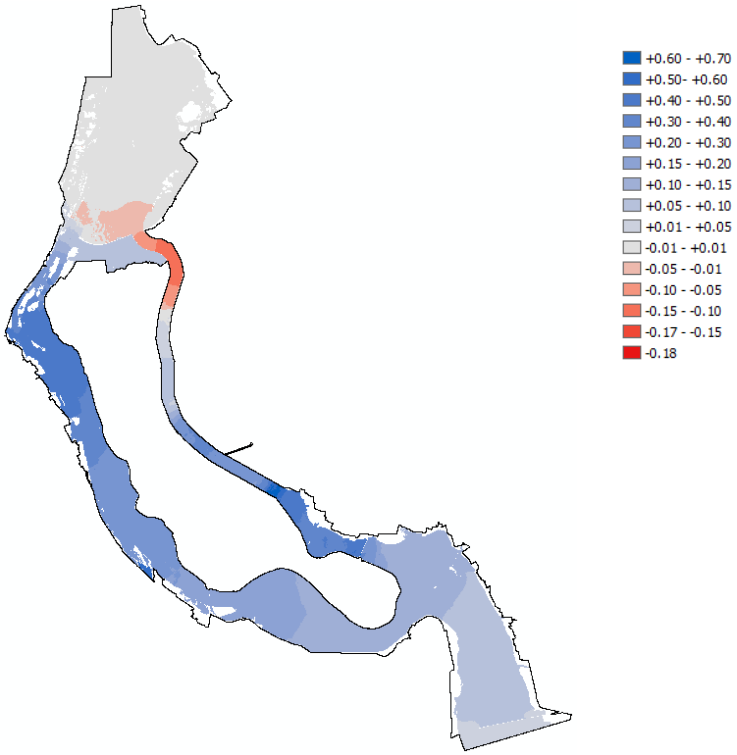


Abbildung 4-20 – Wasserspiegeldifferenzen (in cm) im Szenario SZ7 mit Bezug zum Referenzzustand SZ0 (rot – Anhebung, blau – Absunk)

Aufgrund des Zusammenwirkens verschiedener Maßnahmen, die zuvor separat untersucht worden waren, sind für die Maximalvariante deutliche Wasserspiegelabsenkungen über sehr große Flussbereiche zu verzeichnen. So ergeben sich reduzierte Wasserspiegellagen fast über den gesamten EUK, obwohl sich der Teilabfluss über diese Strecke deutlich erhöht hat. Reduzierte Wasserstände zeigen sich auch für die gesamte Elbstrecke zwischen Barby und Magdeburg mit maximalen Absenkungen im Bereich der Verzweigung zwischen Stromelbe und Alte Elbe. Signifikant erhöhte Wasserstände ergeben sich am Auslauf des EUK im Bereich Heyrothsberge und Friedensweiler mit Auswirkungen nach ober- und unterstrom (Bereich Biederitz, Biederitzer Busch). In der Stromelbe werden auf Höhe des Schleusenkanals geringfügig höhere Wasserstände ausgewiesen. Die untersuchten Maßnahmen haben keinen Einfluss auf die hydraulischen Verhältnisse unterhalb von ca. Elbe-km 331.

4.8.3 Wasserspiegellängsprofile

In nachfolgenden Abbildungen sind die Wasserspiegellagen des Referenzszenarios SZ0 dem Ergebnis des Szenarios 7 gegenübergestellt.

Abbildung 4-21 veranschaulicht die geänderte Wasserspiegellage im EUK, mit niedrigeren Werten im Bereich zwischen dem Pretziener Wehr bis zum Deich-km 4,0 und höheren Werten im weiteren Verlauf. Eine maximale Absenkung von ca. 66 cm ergibt sich im Bereich der Haberlandbrücke. Der maximale Aufstau beträgt 13 cm am Deich-km 2,0.

Aus Abbildung 4-22 geht hervor, dass die Wasserstände in der Alten Elbe trotz der höheren Beaufschlagung über die gesamte Flusstrecke unterhalb der Referenzwerte liegen. Größte Reduzierungen ergeben sich zwischen der Station 0-1200 (Ausmündung bis ca. Radbrücke) mit durchschnittlich 45 cm (maximal 47 cm bei Station 1200). Die Wasserspiegeldifferenzen nehmen im weiteren Verlauf gleichmäßig ab, so dass am Einmündungsbereich in die Stromelbe die Referenzwerte wieder erreicht werden.

Für die Stromelbe ergibt sich für das Szenario S7 eine niedrigere Wasserspiegellage (Schwellwert: 1 cm) vom oberen Modellrand (ca. Elbe-km 293,4) bis ca. Elbe-km 330, wobei maximale Reduzierungen von 45 cm am Elbe-km 323 ermittelt werden. Wasserspiegelanhebungen bis ca. 16 cm ergeben sich zwischen Elbe-km 330-331 (Abbildung 4-23).

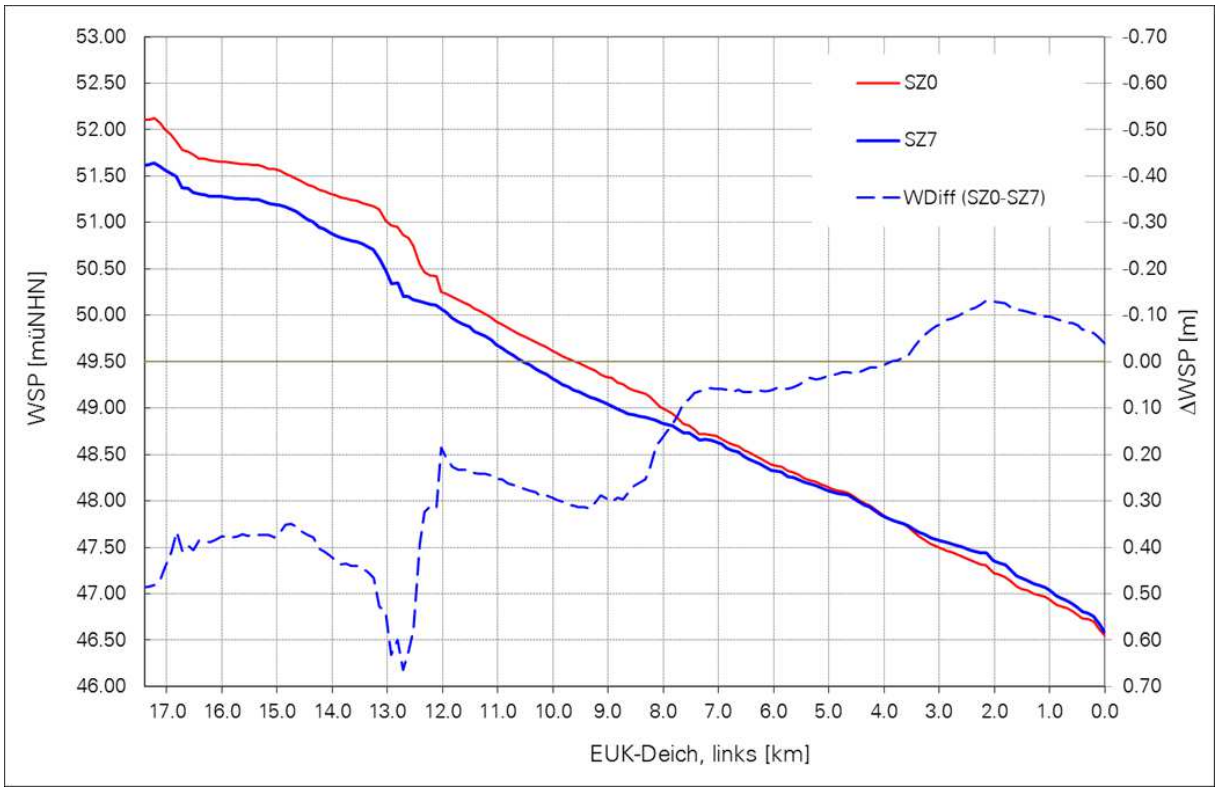


Abbildung 4-21 – Wasserspiegellängsprofil EUK (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ7)

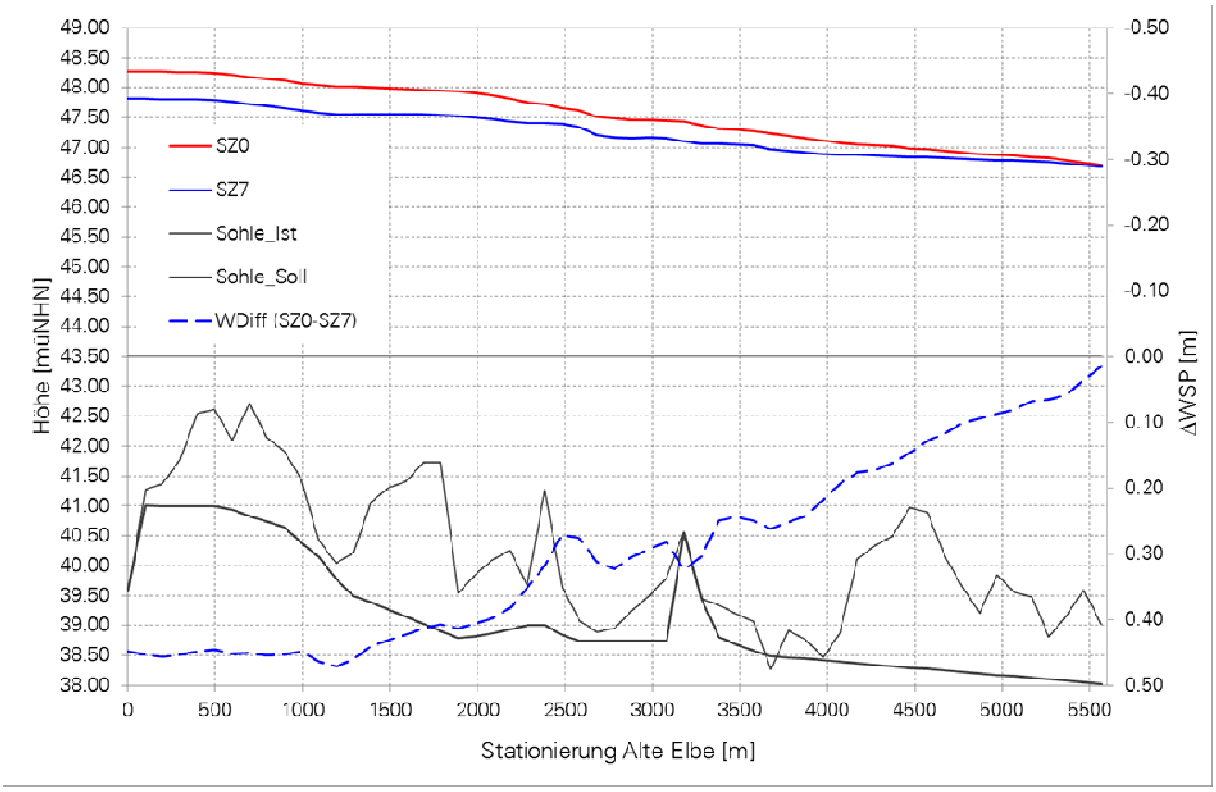


Abbildung 4-22 – Wasserspiegellängsprofil Alte Elbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ7)

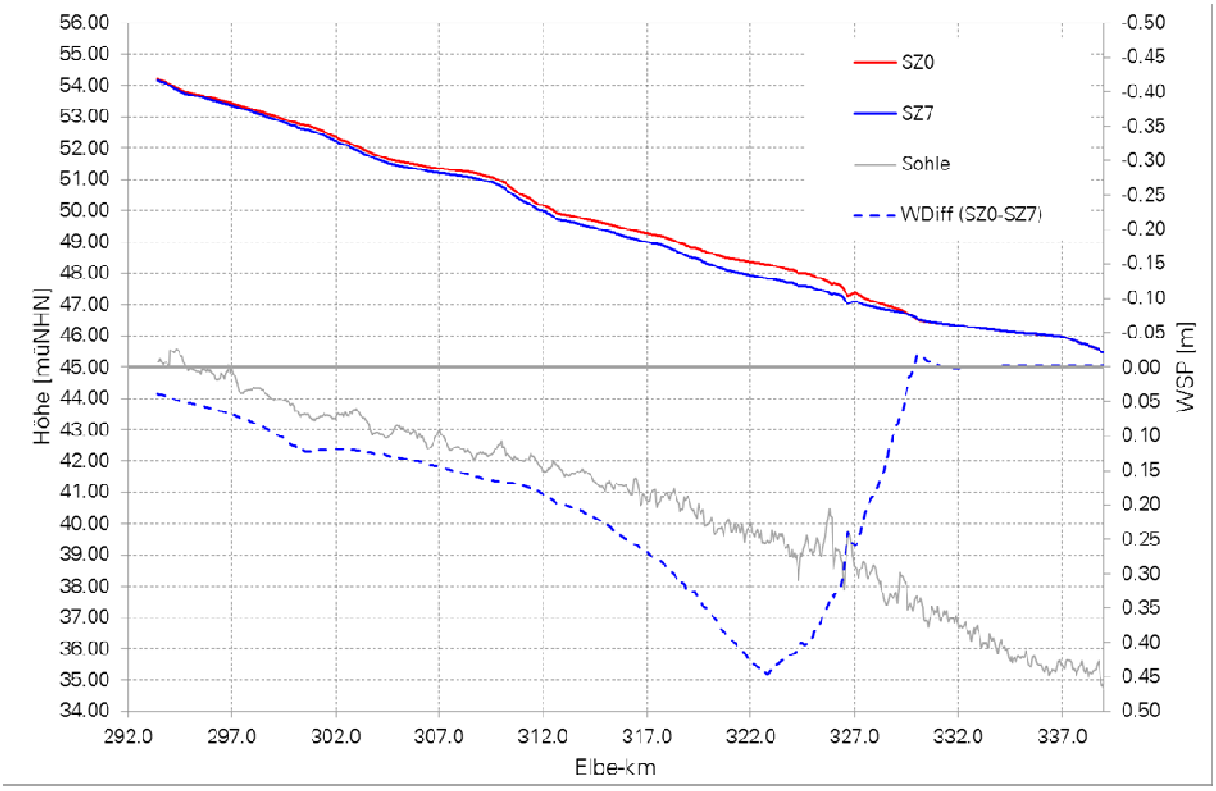


Abbildung 4-23 – Wasserspiegellängsprofil Stromelbe (Q=5090 m³/s, HW2013, SZ7)

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das IWD wurde durch den LHW Sachsen-Anhalt im Mai 2014 mit der Vorbereitung und Durchführung von Szenarienberechnungen mit dem 2D-HN-Modell der Elbe (inkl. Elbe-Umflutkanal) im Bereich Elbe-km 293,5 bis 339,1 beauftragt. Dieses Modell wurde im Vorgängerprojekt seitens des IWD kontrolliert, erweitert und auf das Hochwasserereignis 2013 kalibriert.

Die wesentlichen Ziele dieses Projektes bestanden darin, verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzniveaus im betreffenden Flussgebiet zu modellieren und deren Wirksamkeit und Effektivität mittels 2D-HN-Oberflächenabflusssimulationen zu ermitteln und zu bewerten.

Mit Bezug auf extreme Hochwasserereignisse sollten fünf mögliche Maßnahmen bzw. Tätigkeitsschwerpunkte analysiert werden, die gemeinsam zwischen dem LHW, dem IWD und weiteren Interessensträgern im Vorfeld des Projekts abgestimmt worden sind. Zu untersuchen waren:

- eine teilweise und eine vollständige Entfernung von Bewuchs (Mittel- und Großbewuchs) innerhalb des Elbe-Umflutkanals,
- der mögliche Einfluss des Öffnungszeitpunkts des Pretziener Wehres,
- die Entfernung von Bewuchs (Mittel- und Großbewuchs) im Bereich der Alten Elbe im Stadtgebiet Magdeburgs (mit und ohne Sedimentabtrag in diesem Bereich),
- der Rückbau des Cracauer Wehres in der Alten Elbe (mit und ohne Sedimentabtrag in diesem Bereich)
- der Rückbau der Kanonenbahnbrücken im Bereich der Alten Elbe und des Elbe-Umflutkanals

Aufbauend auf Simulationen, in denen zunächst die separate Wirkung dieser Maßnahmen untersucht worden ist, wurde im Anschluss gemeinsam mit dem AG eine Maximalvariante erarbeitet, welche eine Kombination der effektivsten Einzelmaßnahmen darstellt.

Zusätzlich zu den hochwasserbezogenen Analysen wurde mit dem kalibrierten Modell eine stationäre MQ-Simulation durchgeführt, um die Prognosefähigkeit des Modells auch für diese Verhältnisse bewerten zu können.

Die Modellierungen und Simulationen wurden mit der Software SMS bzw. mit dem Programm HYDRO_AS-2D durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse wurden GIS-kompatibel aufbereitet und dem AG zusammen mit sämtlichen Simulationsdaten in den vertraglich geforderten Umfängen und Formaten übergeben.

In allen Hochwassersimulationen standen die Wasserstandsentwicklung bzw. die maßnahmenbedingten Wasserstandsveränderungen sowie die Abflussaufteilung im Mittelpunkt des Interesses, weshalb sich die Auswertungen auf diese hydraulischen Parameter konzentrierten. Für alle Hochwassersimulationen wurde gemeinsam mit dem AG ein Zufluss von 5090 m^3/s festgelegt.

Die Untersuchungen zielen auch auf die Neuaufstellung bzw. Überprüfung von Bemessungswasserständen an technischen Hochwasserschutzanlagen entlang der Elbe und des Elbe-Umflutkanals ab, da bislang kein offizieller HQ100-Wert für den Pegel Barby benannt worden ist.

Durch die 2D-HN-Simulationen konnte nachgewiesen werden, dass durch folgende Maßnahmen eine großflächige und <u>signifikante</u> Reduzierung der maximalen Wasserspiegellagen herbeigeführt werden kann:

- Bewuchsreduzierung innerhalb des Elbe-Umflutkanals (SZ1T, SZ130)
- Bewuchsreduzierung innerhalb der Alten Elbe in Magdeburg (SZ3)
- Sedimentberäumung in der Alten Elbe in Magdeburg (SZ3S, SZ4S)

Durch folgende Maßnahmen lassen sich die Wasserspiegellagen bei Extremhochwasser bereichsweise geringfügig reduzieren:

- Rückbau der Kanonenbahnbrücken (SZ5)
- Abtrag des „Kleinen Wasserfalls" (SZ4SF)

Keinen nennenswerten Effekt im extremen Hochwasserfall besitzen folgende Maßnahmen:

- ausschließlicher Rückbau des Cracauer Wehrs (ohne Sedimentabtrag, SZ4)
- vorzeitige Öffnung des Pretziener Wehrs (SZ2)

Die innerhalb dieses Projekts gewonnenen Erkenntnisse decken sich qualitativ auch mit den Ergebnissen in HORLACHER & HEYER (2006), wobei dort niedrigere Abflussszenarien für die Vergleichsrechnung herangezogen worden waren, so dass betragliche Veränderungen nicht unmittelbar verglichen werden können.

Mit der aus den Ergebnissen der Einzelmaßnahmen entwickelten Maximalvariante konnte das Potenzial für eine signifikante und großflächige Reduzierung der Scheitelwasserstände im extremen Hochwasserfall im Modellgebiet nachgewiesen werden. Im Detail wurden Wasserspiegelabsenkungen (Bezugsgrößen aus HW2013) im Bereich des EUK von bis zu 70 cm ermittelt (Bereich Haberlandbrücke). In ähnlichem Maße wurden im Stadtgebiet Magdeburgs weitreichende Reduzierungen der Scheitelwasserstände sowohl in der Stromelbe als auch in der Alten Elbe von bis zu 45 cm ausgewiesen. Diese Reduzierungen wirken sich auch auf die oberstrom liegenden Flussstrecken aus, so dass z. B. im Bereich Schönebeck ca. 15-23 cm niedrigere Wasserstände im Vergleich zu den Werten des HW2013 errechnet wurden. Maßnahmenbedingte Absenkungen sind bis zum oberen Modellrand (Bereich Barby) zu verzeichnen.

Es ist jedoch auch zu erwähnen, dass infolge der modellierten Maßnahmen in verschiedenen Bereichen die Referenzwerte des HW 2013 überschritten werden, d. h. es zu einer Anhebung des Wasserspiegels kommt. Diese Bereiche befinden sich für die Maximalvariante in der Stromelbe auf Höhe des Schleusenkanals sowie im Elbe-Umflutkanal im Bereich Heyrothsberge/Friedensweiler sowie auf dem Gebiet des „Biederitzer Buschs". Dabei sind bereichsweise (z. B. Bereich Heyrothsberge) Erhöhungen von über 12 cm zu verzeichnen

Für die Bereiche unterhalb des Elbe-km 311 bzw. unterhalb der Ortslage Biederitz am Auslauf des Elbe-Umflutkanals bewirken die untersuchten Maßnahmen keine nennenswerten Veränderungen im extremen Hochwasserfall.

Da die maßnahmenbedingte Veränderung der Abflussaufteilung einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Wasserstände in den Teilgewässerstrecken besitzt, sind die Aufteilungen, die sich in den untersuchten Szenarien ergaben, in Abbildung 5-1 nochmals zusammengefasst dargestellt.

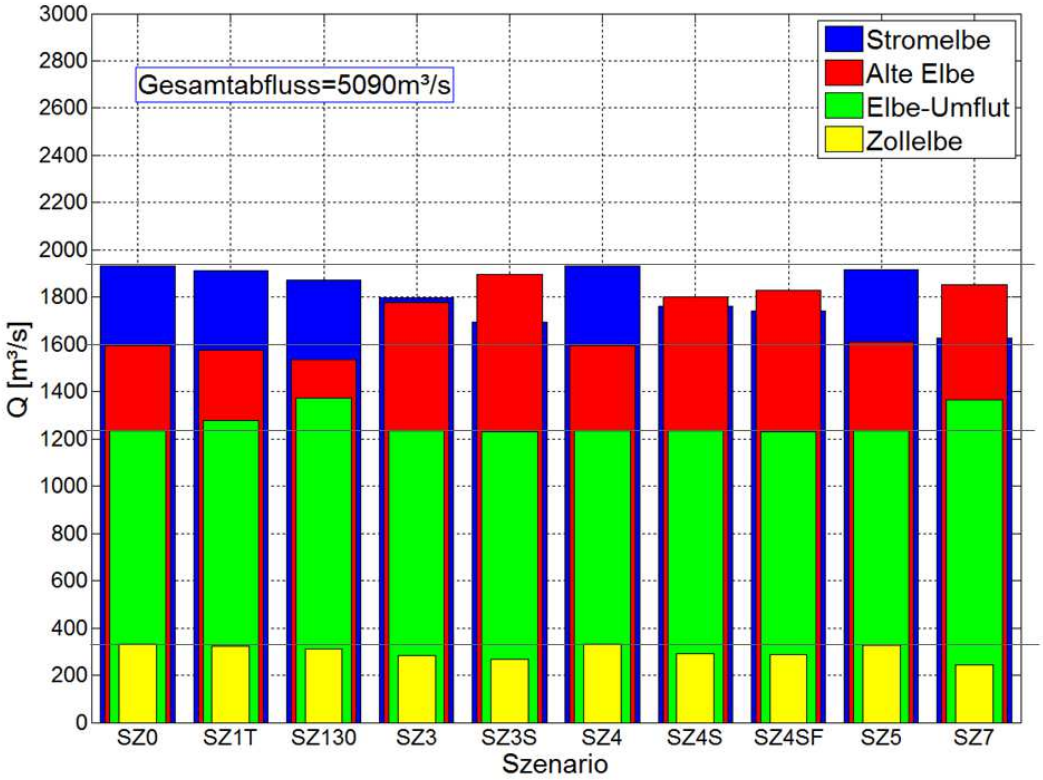


Abbildung 5-1 – Abflussaufteilung in den untersuchten HW-Szenarien (stationär)

Daraus ist ersichtlich, dass die Maßnahmen im EUK (SZ1T, SZ130) zu einer erhöhten Beaufschlagung dieser Gewässerstrecke führen, wobei die prozentuale Abflussaufteilung zwischen Stromelbe und Alte Elbe im Bereich Magdeburg unverändert bleibt. Demgegenüber führen Veränderungen in der Alten Elbe (SZ3S, SZ4S, SZ4SF) zu einer stärkeren Beaufschlagung der Alten Elbe bzw. zu einer entsprechenden Reduzierung in der Stromelbe, ohne dass die Abflussaufteilung zwischen Elbe-Umflutkanal und Stadtstrecke Magdeburg beeinflusst wird. Im Szenario SZ7 ist die Kombination der eben erwähnten Effekte ersichtlich.

Während die hier getroffenen qualitativen Aussagen bezüglich der maßnahmenbedingten Veränderungen allgemeingültiger Natur sind und zu einem verbesserten Verständnis der hydraulischen Zusammenhänge im untersuchten Gewässersystem beitragen sollen, sind die quantitativen Aussagen zu den erreichbaren Reduzierungen eng an die im Modell definierten Bedingungen (Fließwiderstandsbeiwerte, Bathymetrien) geknüpft. Es ist deshalb im Detail zu überprüfen, ob die im Modell abgebildeten Maßnahmen in der Natur in diesem Maße umgesetzt werden bzw. ob die modellierten Verhältnisse (z. B. Fließwiderstandsbeiwerte) in Realität erreicht werden können.

Darüber hinaus müssen im Hinblick auf die Umsetzbarkeit der modellierten Maßnahmen zahlreiche weitere Aspekte berücksichtigt werden. Der Aspekt der Nachhaltigkeit möglicher Maßnahmen (z. B. Sedimententnahmen, Bewuchsreduzierungen und damit verbundene dauerhafte Unterhaltungsmaßnahmen) soll an dieser Stelle besonders hervorgehoben werden. Das vorrangige Ziel dieses Projekts, das im Untersuchungsgebiet vorhandene Potenzial für eine Verbesserung des Hochwasserschutzniveaus aufzuzeigen, wurde mit diesen Untersuchungen erreicht.

6 QUELLEN

DGJ (2004) Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Elbegebiet, Teil 1 (2002), Herausgeber: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft, Sachsen-Anhalt. Magdeburg. 2004

FGG (2013) Flussgebietsgemeinschaft Elbe: Darstellung des Hochwassers 2013 im Einzugsgebiet der Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Elbe. 2013

HORLACHER, HEYER & MÖRICKE (2002) Horlacher, H-B.; Heyer, T.; Möricke, U.: "Untersuchungen zur Sicherung des Hochwasserschutzes im Raum Magdeburg". Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD). TU Dresden. Forschungsbericht 2002/12. Dresden. Dezember 2002

HORLACHER & HEYER (2006) Horlacher, H-B.; Heyer, T.: "Beurteilung des Abflussgeschehens am Pegel Magdeburg". Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD). TU Dresden. Forschungsbericht 2006/05. Dresden. Juni 2006

HORLACHER, HEYER & KOPP (2008) Horlacher, H-B.; Heyer, T.; Kopp, T.: "Begleitende hydraulische Analyse der FFH-Verträglichkeitsprüfung von Maßnahmen in der Alten Elbe bei Magdeburg". Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD). TU Dresden. Forschungsbericht 2008/07. Dresden. Juli 2008

KÜLLIG (2014) Küllig, A.: „Untersuchungen zu Möglichkeiten einer differenzierten Berücksichtigung von Bewuchsverhältnissen (Mittel- und Großbewuchs) in zweidimensionalen, hydrodynamisch-numerischen Oberflächenabflusssimulationen“. Diplomarbeit. Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden. Dresen. Mai 2014

LHW (2005) Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt: „Hochwasserregelung der Elbe und Elbumflut im Raum Magdeburg durch die Wehranlage Pretzien – Bedienungsanweisung Pretziener Wehr“. LHW. Schönebeck. Dezember 2005

LHW (2014) Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt: „Bericht über das Hochwasser im Juni 2013 in Sachsen-Anhalt“. LHW. Magdeburg. März 2014

STAMM & HEYER (2009) Stamm, J.; Heyer, T.: „Wasserspiegellagenberechnung für die Elbe im Bereich Magdeburg“. Institut für

Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD). TU Dresden. Forschungsbericht 2009/13. Dresden. Dezember 2009

STAMM & HEYER (2014) Stamm, J.; Heyer, T.: „Ad-hoc Einsatz Elbe-Hochwasser 2013; 2D-HN-Abflusssimulationen und Messeinsatz am Elbe-Umflutkanal". GWT-TUD GmbH. Forschungsbericht 2014/03. Dresden. Mai 2014

STAMM ET AL. (2014) Stamm, J.; Heyer, T.; Dapoz, P.; Küllig, A: „Modellerweiterung und WSP-Modellierung zum Hochwasser 2013 entlang der Elbe vom Pegel Barby bis zur BAB 2 (Stadtstrecke Magdeburg)". Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD). TU Dresden. Forschungsbericht 20013/12. Dresden. April 2014

STZ (2012) Steinbeis-Transferzentrum (STZ): „Hydraulische Wasserspiegellagenmodellierung der Elbe für den Bereich der Stadtstrecke Magdeburg (Elbe-km 294,82 - Pegel Barby bis Elbe-km 338,5 - Bundesautobahnbrücke BAB 2 bei Magdeburg)". Projektbericht. Magdeburg. 2012

THM 1 (1992) Bollrich, G.; Preißler, G.: „Technische Hydromechanik, Band 1 - Grundlagen". Verlag für Bauwesen. Berlin/München. 1992

UNDINE (2013) Informationsplattform Undine: Datengrundlagen zur Einordnung und Bewertung hydrologischer Extreme. Internet: http://undine.bafg.de/servlet/is/12098/ (Zugriff am 04.04.2014)

VSMD (2013) Marketing Service Magdeburg GmbH; Volksstimme Magdeburg: „Die große Flut". Magdeburg. 2013