

# **Wasserbauliche Systemanalyse zur Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels für tidebeeinflusste Nebengewässer der Elbe**

von Edgar Nehlsen

**Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg**

## **Hamburger Wasserbauschriften, Band 19**

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliothek; detaillierte Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

### **Impressum**

#### **TUTECH Verlag**

TUTECH INNOVATION GMBH  
Harburger Schloßstraße 6-12  
21079 Hamburg

Telefon: +49 40 76629-0

Fax: +49 40 76629-6559

E-Mail: [verlag@tutech.de](mailto:verlag@tutech.de)

[www.tutechverlag.de](http://www.tutechverlag.de)

Nachdrucke, Vervielfältigungen, Speicherung oder Übertragung in elektronische, optische, chemische oder mechanische Datenhaltungs- oder Datenverwertungssysteme sind – auch auszugsweise – ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung von TUTECH INNOVATION GMBH verboten.

Die Verwertung von Informationen aus Hamburger Wasserbauschriften zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.

© TUTECH INNOVATION GMBH

1. Auflage Oktober 2017

ISSN 1612-8699

ISBN 978-3-946094-22-7

# **Wasserbauliche Systemanalyse zur Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels für tidebeeinflusste Nebengewässer der Elbe**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Edgar Nehlsen

aus  
Lübeck

2017

Aufzählung der Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle
2. Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
3. Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schneider

Tag der mündlichen Prüfung: 17.11.2016

## Vorwort

Climate change "It is, simply, the greatest collective challenge we face as a human family" sagte UN Generalsekretär Ban Ki-moon in 2009. Auch im jetzt bereits 5. Assessment Report geht das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) davon aus, dass die globale Erwärmung der Erde zumindest mittelfristig weiter zunehmen wird, mit den daraus resultierenden Folgen für meteorologische Prozesse, Umweltbedingungen und Ökosysteme, Mensch sowie Infrastruktur und Wirtschaft. Der Anstieg der Temperaturen und der Anstieg des Meeresspiegels sind bereits heute aus Messreihen deutlich zu erkennen. Zumindest von den Schäden her nehmen auch Zahl und Heftigkeit hydro-meteorologischer Extremereignisse weltweit zu.

Seit mehreren Jahren stellen Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Systeme und mögliche Anpassungsmaßnahmen einen Schwerpunkt der Arbeiten des Instituts für Wasserbau der TUHH dar. In diesem Zusammenhang wurde eine Vielzahl von Forschungsvorhaben durchgeführt.

Küsten, Ästuar und deren Nebenflüsse sind als Grenzzonen zwischen Meer und Land von den aus dem Klimawandel resultierenden Veränderungen besonders betroffen. Ein höherer mittlerer Meeresspiegel führt zu höheren mittleren und extremen Wasserständen und zu Veränderungen im Tidegeschehen. Eine Zunahme der Sturmintensität führt zu weiter erhöhten Sturmflutwasserständen. Veränderte Niederschlagsregime und intensivere Niederschläge führen zu Veränderungen im Abflussgeschehen und im Wasserhaushalt. Insgesamt wird sich das hydrodynamische Geschehen zukünftig verändern. Dies führt dann zwangsläufig dazu, dass sich auch die Transportprozesse verändern. Zudem sind Küsten, Ästuar und deren Nebenflüsse in vielerlei Hinsicht besonders sensible Systeme und unterliegen einem hohen Nutzungsdruck. Dies trifft natürlich auch auf das Elbeästuar und die tidebeeinflussten Elbe-Nebenflüsse (Medem, Oste, Stör, Krückau, Pinnau, Schwinge, Lühe, Este, Alster, Bille Seeve und Ilmenau) zu.

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die vorgenannten Bereiche bewerten zu können und als Grundlage für eine Anpassung an den Klimawandel sind quantitative Aussagen zu den zu erwartenden Veränderungen erforderlich. Während insbesondere die hydrodynamischen Prozesse in den Hauptströmen der Ästuar zumeist recht gut untersucht und beschrieben sind und dort auch ein wasserbauliches Systemverständnis bereits recht weit fortgeschritten ist, sind Messungen und Analysen aus wasserbaulicher Sicht für Nebenflüsse bisher nur selten und dann praktisch ausschließlich projektbasiert durchgeführt worden. Systematische Analysen hierzu liegen praktisch nicht vor. Vielfach fehlt es zudem bereits an den hierzu erforderlichen Daten und Modellergebnissen. D.h. die Grundlagen für eine Bewertung von Veränderungen muss zunächst durch eine systematische Analyse noch geschaffen werden.

Die in diesem 19. Band der Hamburger Wasserbauschriften veröffentlichte und somit nun allgemein vorliegende Dissertation von Herrn Dr. Edgar Nehlsen ist die erste umfassende wissenschaftliche Arbeit, die sich aus wasserbaulicher Sicht mit der Systemanalyse für Nebenflüsse von großen Ästuar und darauf aufbauend mit der Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels befasst. Herr Dr. Nehlsen hat ein sehr aktuelles und gesellschaftlich relevantes Thema aufgegriffen, welches zudem hochkomplex ist. Die vielfältigen Ergebnisse der Arbeit helfen, mögliche negative Auswirkungen des Klimawandels quantitativ abzuschätzen und entsprechende Anpassungsmaßnahmen frühzeitig zu planen und umzusetzen.

Der Grundstein für die Arbeit von Herrn Dr. Nehlsen wurde in dem Forschungsvorhaben KLIMZUG-Nord gelegt. Seine Arbeiten haben maßgeblich zum Erfolg dieses Vorhabens beigetragen. Die Ergebnisse seiner Arbeiten sind bereits direkt in mehrere praktische Forschungsvorhaben eingeflossen. KLEE – Klimaanpassung im Einzugsgebiet der Este – und KAREL – Klimaanpassung des Regenwassernetzes von Elmshorn und Umland – sind zwei gute Beispiele aus denen konkrete Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel abgeleitet und auch umgesetzt werden.

Es freut mich persönlich sehr, dass Herr Dr. Nehlsen seine vielfältigen Arbeiten am Institut mit der vorliegenden Schrift zu einem sehr guten Abschluss gebracht hat. Darüber hinaus freut es mich natürlich auch, dass Herr Dr. Nehlsen dem Institut für Wasserbau der TUHH auch nach Abschluss seiner Dissertation als Oberingenieur treu geblieben ist und mich als einer der leitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter des Instituts bei der Arbeit im Institut hervorragend unterstützt. Es macht Spaß mit ihm zusammenzuarbeiten und seine fachlichen und menschlichen Kompetenzen zu sehen.

Dem interessierten Leser lege ich die Arbeit von Herrn Dr. Nehlsen mit dem Titel „Wasserbauliche Systemanalyse zur Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels für tidebeeinflusste Nebengewässer der Elbe“ sehr ans Herz. Sie enthält eine Fülle von wichtigen Ergebnissen für zukünftige wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Planungen.

Peter Fröhle

Leiter des Instituts für Wasserbau der TUHH

## Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) und ist das Ergebnis meiner Arbeiten an mehreren Forschungsvorhaben.

An dieser Stelle möchte ich die Möglichkeit nutzen, den vielen hilfsbereiten Menschen zu danken, ohne die diese Arbeit nicht in der vorliegenden Form zustande gekommen wäre.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle, der mir diese Dissertation ermöglichte und mich betreut hat. Sein Rat, die vielen Impulse und die intensiven fachlichen Diskussionen haben mich stets vorangebracht und motiviert. Die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit ihm war sehr lehrreich und hat mit viel Spaß bereitet. Ich freue mich sehr darüber, dass wir diese Zusammenarbeit in anderer Konstellation fortsetzen können.

Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf und Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schneider danke ich herzlich für die Übernahme der Begutachtung meiner Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Schneider danke ich außerdem dafür, dass er zwischenzeitlich die Betreuung meiner Dissertation übernommen hat. Prof. Dr.-Ing. Günther Rombach danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Erik Pasche, der mich bereits als Student für den Wasserbau begeistert und mir den Anstoß zur Anfertigung dieser Arbeit gegeben hat. Sein früher Tod war menschlich wie fachlich ein herber Verlust.

In dieser nicht einfachen Phase traf ich auf einige Personen, die meine Arbeit fortan begleiteten und mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Dr.-Ing. Karl-Friedrich Daemrich danke ich herzlich für die vielen konstruktiven Anmerkungen und die motivierenden Gespräche, die mich immer erreichten. Prof. Dr. Gabriele Gönnert und Prof. Dr.-Ing. Heinrich Reincke danke ich für ihren fachlichen Rat und die Inspirationen.

Im Rahmen der Bearbeitung der eingangs erwähnten Forschungsvorhaben war es mir möglich, neben meiner wissenschaftlichen Arbeit einen umfangreichen Einblick in die wasserwirtschaftliche Ingenieurpraxis zu erhalten, was sich in gleich doppelter Hinsicht als vorteilhaft erwiesen hat. Zum einen habe ich durch die Zusammenarbeit mit den Praktikern wertvolle Hinweise erhalten, die deutlich zur Verbesserung des Systemverständnisses im Bereich der tidebeeinflussten Nebenflüsse beigetragen haben. Zum anderen war es mir möglich, im Rahmen der Anfertigung meiner Dissertation stets den Bezug zur Ingenieurpraxis zu wahren.

Es ist an dieser Stelle unmöglich, alle Institutionen und Personen aus der Ingenieurpraxis zu nennen, die mich unterstützt haben. Stellvertretend für die große Anzahl an Unterstützern möchte ich nachfolgend einige Namen nennen: Frerk Jensen vom LKN-SH, Thomas Beiersdorf von der Stadtentwässerung Elmshorn, Eckhard Dittmer von der Stadtentwässerung Buxtehude, Dr.-Ing. Thomas Hirschhäuser vom LLUR-SH, Bernhard Schürmann vom NLWKN Stade, Georg Söhle vom LK Stade, Gunnar Peter vom LK Harburg, Dr.-Ing. Olaf Müller vom LSBG sowie Manfred Junge und Dr.-Ing. Ingo Entelmann vom WSA Hamburg. Den genannten Personen danke ich sowohl für den fachlichen Dialog als auch dafür, dass sie mit dem Zugang zu den so unverzichtbaren Daten ermöglicht haben.

Mein herzlicher Dank gilt natürlich auch allen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Wasserbau der TUHH für die tolle Zusammenarbeit und die geselligen Momente. Insbesondere möchte ich mich bei Dr.-Ing. Monika Donner und Nico Schrage für die gemeinsame Zeit, den fachlichen Austausch und die wertvollen Unterhaltungen bedanken. Unserer Laboringenieurin Katrin Coelius und unserem Laboringenieur Jens Winkelbauer danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Messkampagnen. Außerdem möchte ich mich bei Suleman Shaikh bedanken, der mich zunächst als studentische Hilfskraft und dann als Kollege unterstützt hat. Weitere Studentinnen und Studenten, denen ich für die Unterstützung bei der Datenaufbereitung und –auswertung besonders danken möchte, sind Jan Stolzenwald, Evelyn Heins und Vanessa Sohr.

Bei meiner Familie – insbesondere bei meinen Eltern – bedanke ich mich für die fortwährende Unterstützung. Der größte Dank gilt meiner Frau Jessica, die mir stets zur Seite stand, mich bedingungslos unterstützt und liebevoll motiviert hat. Bei meinen beiden Kindern, die mich ein Stück weit entbehren mussten, bedanke ich mich für dafür, dass sie für die nötige Balance gesorgt haben. Meinem Freund Alexander danke ich für die ausgleichenden Freizeitaktivitäten und das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Zu guter Letzt gilt mein aufrichtiger Dank allen weiteren Unterstützern, die zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben und an dieser Stelle nicht genannt wurden.

Edgar Nehlsen, Oktober 2017

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Einführung.....	1
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Zielsetzung und Fragestellungen.....	4
1.4 Vorgehensweise.....	9
<b>2. Methodik</b> .....	<b>10</b>
2.1 Wasserbauliche Systemanalyse.....	10
2.2 Datenaufnahme und -aufbereitung.....	11
2.2.1 Schwebstoffmessungen in der Natur.....	12
2.2.2 Fächerlotpeilungen in der Natur.....	14
2.3 Integrierte Modellierung.....	16
2.3.1 Niederschlag-Abfluss-Modellierung.....	17
2.3.2 Hydrodynamische /Morphodynamische Modellierung.....	21
2.4 Sensitivitätsstudien.....	34
<b>3. Unterelbe</b> .....	<b>36</b>
3.1 Unterelbe zwischen Geesthacht und Cuxhaven.....	36
3.2 Flussbauliche Maßnahmen.....	38
3.2.1 Sicherung des Siedlungs- und des landwirtschaftlich genutzten Raumes.....	38
3.2.2 Verbesserung der Schiffbarkeit.....	40
3.3 Hydrologie und Morphologie der Unterelbe.....	41
3.3.1 Abflüsse, Wasserstände und Strömungen.....	42
3.3.2 Morphologische Merkmale.....	52
3.3.3 Dynamik des Schwebstofftransportes.....	55
3.3.4 Morphologische Änderungen und Sedimentmanagement.....	60
3.4 Zusammenfassung.....	61
<b>4. Nebenflüsse der Unterelbe</b> .....	<b>64</b>
4.1 Hochwasserschutz und Entwässerung des Hinterlandes.....	66
4.1.1 Hochwasserschutzanlagen.....	69
4.1.2 Entwässerung des Hinterlandes.....	72
4.2 Hydrologie und Morphologie.....	75
4.2.1 Morphologische Merkmale.....	75
4.2.2 Abflüsse, Wasserstände und Strömungen.....	82
4.3 Statistische Auswertung und Einordnung seltener Schließereignisse.....	103
4.3.1 Beschreibung und Auswahl der Lastfälle.....	104

4.3.2	Auswertung der Datengrundlage .....	107
4.4	Morphodynamik und morphologische Entwicklung der Unterläufe .....	119
4.4.1	Sedimenttransport und Morphodynamik .....	119
4.4.2	Morphologische Entwicklung.....	145
4.5	Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse.....	154
<b>5.</b>	<b>Auswirkungen des Klimawandels.....</b>	<b>159</b>
5.1	Klimawandel und Meeresspiegelanstieg .....	160
5.1.1	Klimawandel und Klimamodellierung .....	160
5.1.2	Projizierte Änderungen der Klimaparameter für die Einzugsgebiete der Nebenflüsse.....	161
5.1.3	Meeresspiegelanstieg.....	164
5.1.4	Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf das Elbe-Ästuar.....	166
5.2	Auswirkungen des Klimawandels auf die Nebenflüsse.....	168
5.2.1	Binnenabfluss .....	168
5.2.2	Wiederkehrintervall seltener Schließereignisse.....	180
5.2.3	Schwebstofftransport und Morphodynamik .....	182
5.3	Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse.....	187
<b>6.</b>	<b>Diskussion der wesentlichen Erkenntnisse .....</b>	<b>190</b>
6.1	Statistische Einordnung seltener Schließereignisse.....	190
6.2	Morphodynamik und morphologische Entwicklung.....	191
6.3	Auswirkungen des Klimawandels .....	193
6.3.1	Auswirkungen auf das Abflussgeschehen .....	193
6.3.2	Auswirkungen auf das Wiederkehrintervall seltener Schließereignisse.....	194
6.3.3	Auswirkungen eines veränderten Meeresspiegels auf den Schwebstofftransport .....	195
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>196</b>
7.1	Zusammenfassung.....	196
7.2	Ausblick.....	197
7.2.1	Statistische Einordnung seltener Schließereignisse.....	197
7.2.2	Morphodynamik und morphologische Entwicklung .....	198
7.2.3	Auswirkungen des Klimawandels .....	198
<b>Anhang .....</b>	<b>.....</b>	<b>200</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>.....</b>	<b>203</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>.....</b>	<b>212</b>
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>.....</b>	<b>215</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>.....</b>	<b>216</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>.....</b>	<b>232</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Einführung

Die Unterelbe erstreckt sich vom Wehr bei Geesthacht (km 585,9) bis zur Mündung in die Nordsee bei Cuxhaven (km 727,7). In die Unterelbe münden zwölf größere Nebenflüsse (Abbildung 1). Gemeinsam entwässern diese zwölf Flüsse ein Einzugsgebiet von rund 9826 km<sup>2</sup>, was in etwa 75% des gesamten Einzugsgebietes der Unterelbe entspricht. Die Einzugsgebiete der Nebenflüsse umfassen weite Teile des Bundeslandes Hamburg und reichen weit ins Binnenland der angrenzenden Bundesländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein hinein.

Die Oberläufe der Nebenflüsse durchfließen die Geest, die durch glaziale Sandablagerungsprozesse entstanden ist. Aufgrund des Reliefs erfolgt hier die Entwässerung des Einzugsgebietes im freien Gefälle. Die Unterläufe der Nebenflüsse durchfließen die Elbmarsch, ein Niederungsgebiet, das im Zuge von nacheiszeitlichen maritimen Sedimentationsprozessen entstanden ist. Der Übergang von der Geest zur Marsch vollzieht sich oberflächlich in Form eines deutlichen Höhensprungs von einigen Metern über Normalhöhennull (grüne Flächen) auf etwas unter Normalhöhennull (beigefarbene Flächen).

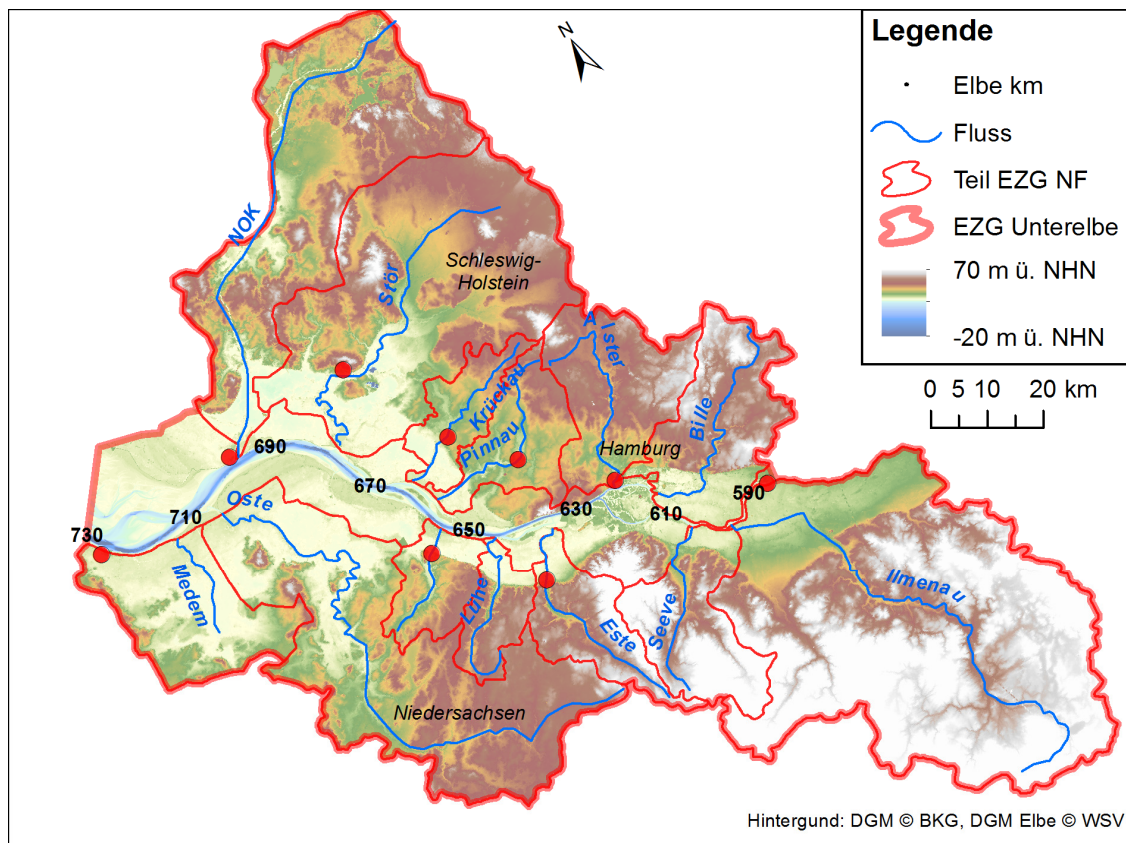


Abbildung 1: Hydrographische Übersichtskarte der Unterelbe und ihre Nebenflüsse

Die Unterläufe von acht der zwölf Nebenflüsse (Stör, Krückau, Pinnau, Oste, Schwinge, Lüne, Este, Ilmenau) unterliegen dem Tideinfluss der Nordsee, der über die Elbe einschwingt. Die übrigen vier Nebenflüsse (Alster, Bille, Medem, Seeve) sind durch Siele oder Schleusen von der

Elbe entkoppelt. Aufgrund der geringen Geländehöhen im Bereich der Marsch, die unterhalb der mittleren Wasserstände liegen, sind die Unterläufe aller Nebenflüsse komplett eingedeicht. Die Entwässerung des Deichhinterlandes erfolgt heutzutage nur zum Teil in der freien Vorflut. Der Großteil der Entwässerung erfolgt durch Schöpfwerke, die das Wasser in die Nebenflüsse fördern.

In den Einzugsgebieten der Nebenflüsse leben über drei Millionen Menschen, von denen knapp die Hälfte im Hamburger Stadtgebiet wohnt. Ein weiterer großer Anteil der Bevölkerung lebt verteilt auf mehrere Städte im Einzugsgebiet. Viele dieser Städte, wie z.B. Itzehoe, Elmshorn, Pinneberg, Buxtehude und Stade, liegen unmittelbar an einem Nebenfluss der Unterelbe. Diese Städte haben heute z.T. deutlich mehr als 30.000 Einwohner und übernehmen in ihrer Region die Funktion von Mittelzentren, indem sie ihr Umland mit Waren, Dienstleistungen und Infrastruktur versorgen, die über den Grundbedarf hinausgehen.

Außerhalb der Siedlungsgebiete werden in den Einzugsgebieten der Nebenflüsse viele Flächen landwirtschaftlich genutzt. Dabei sind die Flächen im Bereich der Elbmarsch von besonderer Bedeutung. Die fruchtbaren Böden und das milde Klima bieten optimale Anbaubedingungen. Einige Anbauabschnitte in der Elbmarsch haben überregionale Bedeutung erlangt. Das Alte Land, das zu großen Teilen von der Este und der Lühe entwässert wird, zählt zu den bedeutendsten Obstanbaugebieten Mitteleuropas (Görgens 2011). Im Kreis Pinneberg, der im Wesentlichen von der Pinnau und der Krückau entwässert wird, befindet sich das größte zusammenhängende Baumschul- und Gartenbaugebiet Europas (MLUR 2011).

Darüber hinaus befinden sich in den Einzugsgebieten viele Schutzgebiete unterschiedlicher Kategorien, wie z.B. FFH<sup>1</sup>-Gebiete, Vogelschutzgebiete, Landschaftsschutzgebiete, Naturparks und Naturschutzgebiete.

Aufgrund ihrer exponierten Lage am Übergang von der Geest zur Marsch sind die Städte sowohl im Fall von Binnenhochwassern in den Nebenflüssen als auch im Fall von Sturmfluten in der Elbe von Überflutungen bedroht. Außerdem hängen ein Großteil der Entwässerung der Städte sowie die gesamte Entwässerung der tiefliegenden Flächen in der Marsch von den Vorflutverhältnissen in den Nebenflüssen ab. Die Vorflutverhältnisse werden im Wesentlichen von den Wasserständen und der Morphologie der Nebenflüsse beeinflusst.

Zum Schutz vor Sturmfluten wurden an den Mündungen der tidebeeinflussten Nebenflüsse in den 1960er und 1970er Jahren Sturmflutsperrwerke errichtet. Diese werden bei höheren Wasserständen in der Elbe geschlossen und erst bei annähernder Spiegelgleichheit wieder geöffnet. Während der Sperrung kann der Oberwasserzufluss nicht in die Elbe abfließen, sondern muss in dem verfügbaren Stauraum auf der Binnenseite der Sperrwerke zwischengespeichert werden.

---

<sup>1</sup> Flora-Fauna-Habitat

## 1.2 Problemstellung

Die heutige Situation an den Nebenflüssen ist das Resultat eines mehrere Jahrhunderte andauernden Entwicklungsprozesses, der u.a. durch sich verändernde Standort- und Rahmenbedingungen gekennzeichnet ist. Diese Änderungen verliefen zumeist stetig, teilweise jedoch auch sprunghaft. Die Entwicklung der Städte wurde durch einige Standortvorteile begünstigt, wie:

- i) die Nähe zu den fruchtbaren Marschen, die zu kurzen Arbeits- und Transportwegen führte,
- ii) eine vergleichsweise hohe Sicherheit vieler Flächen vor Hochwasser und Überflutungen,
- iii) die Nutzung der Nebenflüsse zur Wasserver- und Regenwasserentsorgung sowie
- iv) die Nutzung der Nebenflüsse als Produktionsstandort und Schifffahrtsweg.

Die Nähe zu den fruchtbaren Marschen ist bis heute erhalten geblieben. Allerdings hat dieser Standortvorteil an Bedeutung verloren, da immer mehr Arbeitsschritte in der Anbaukette von Maschinen übernommen wurden und in Folge dessen der Anteil der Beschäftigten in der Landwirtschaft deutlich zurückgegangen ist. Außerdem wird ein Großteil der Anbauprodukte auch überregional gehandelt, was Transporte über längere Strecken erforderlich macht. Aus wirtschaftlichen Gründen erfolgt nahezu der gesamte Transport per Lastkraftwagen. Der Einsatz von Schiffen zum Transport der Waren bildet die Ausnahme.

Die Sicherheit vor Hochwasser und Überflutungen hat nach wie vor eine große Bedeutung. Entsprechend der Europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Bezeichnung *Hochwasserrisiko*<sup>2</sup> verwendet. Im Laufe der Zeit wurden an den Nebenflüssen immer mehr Maßnahmen zur Vermeidung von Überflutungen umgesetzt, die das Hochwasserrisiko verringern. Beispiele hierfür sind die Eindeichung der Unterläufe, die Entwicklung eines ausgeklügelten Entwässerungssystems in der Marsch und nicht zuletzt der Bau der Mündungssperrwerke in den 1960er und 1970er Jahren. Die Inbetriebnahme letzterer führte zu einer deutlichen Reduktion des Hochwasserrisikos an den Nebenflüssen und zu einer grundsätzlichen Änderung bei der Entstehung von Hochwassersituationen. Durch die Kehrung der Sturmfluten fallen die Wasserstände hinter den Sperrwerken deutlich niedriger aus. Allerdings kann durch die Entkopplung von der Elbe auch kein Wasser abfließen, wodurch es auf der Binnenseite des Sperrwerks zu einem Aufstau des Binnenabflusses kommt. Die maßgebende Hochwassersituation entsteht nun also durch die Kombination einer Kettentide in der Elbe, die eine langanhaltende Sperrung verursacht, mit einem Binnenhochwasser im Nebenfluss.

Insgesamt zeigten die umgesetzten Hochwasserschutzmaßnahmen in den letzten Jahrzehnten Wirkung. Mit Ausnahme einzelner kleinerer Gebiete kam es seit der Sturmflut 1962 zu keinen großflächigen Überflutungen in den Niederungen der Nebenflüsse. Dieses sehr geringe – aber trotzdem vorhandene – Risiko hat auch eine Kehrseite. In der Folge führte das in Ermangelung von Schadensereignissen stetig anwachsende Sicherheitsgefühl in Kombination mit dem größer werdenden Siedlungsdruck zu einem Anwachsen der Siedlungsflächen in den tiefliegenden Gebieten. Die Siedlungsflächen sind prinzipiell durch die Hochwasserschutzanlagen vor

---

<sup>2</sup> Das Hochwasserrisiko ist definiert als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses und des Schadenspotentials (vgl. u.a. Fleming 2002).

Überflutungen geschützt. Im Fall eines Versagens einer oder mehrerer Bestandteile des Systems würden die tiefliegenden Flächen, die vor allem im Bereich der Siedlungen ein hohes Schadenspotential aufweisen, überflutet.

Die Nutzung der Nebenflüsse zur Wasserversorgung hat heute nur noch für die Landwirtschaft zum Zweck der Bewässerung oder zur Frostschutzberegnung eine Bedeutung. Das Trinkwasser in der Region wird mittlerweile in der Regel aus Grundwasser gewonnen. Allerdings kann der Aspekt der Wasserversorgung der Landwirtschaft im Zuge einer möglichen Verschiebung der Brackwasserzone in Richtung stromauf zukünftig an Bedeutung gewinnen, da bereits ein geringer Salzgehalt Schäden an den meisten Pflanzen verursachen kann.

Bei der Entsorgung von Regenwasser spielen die Nebenflüsse auch heute noch eine wichtige Rolle, die weiter an Bedeutung gewinnt. Gründe sind die größer werdenden Siedlungsflächen und die weitere Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung der Marschen. Zum Beispiel entsorgt die Stadt Elmshorn mittlerweile rund 90% des anfallenden Regenwassers in die Krückau. Im Bereich des Alten Landes werden die Wasserstände in den Gräben und Wettern unterhalb des Tideniedrigwassers gehalten, um Schäden an den Obstbäumen durch aufstauendes Wasser zu vermeiden. Dem großen Bedarf an einer zuverlässigen Entwässerung stehen die steigenden mittleren Tidehochwasserstände und die abschnittsweise verlandenden Gewässersohlen entgegen, die zu einer Verschlechterung der Vorflutverhältnisse führen.

Die intensive Nutzung der Nebenflüsse als Transportweg und als Produktionsstandort (Werften) ging mit den zunehmenden Schiffsgrößen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts deutlich zurück. Der Hauptgrund waren die für die größeren Schiffe unzureichenden Wassertiefen. Mit dem Rückgang der Schifffahrt auf den Nebenflüssen wurden auch aufwändige Unterhaltungsmaßnahmen, wie z.B. Baggerungen der Fahrrinne, stark zurückgefahren. In der Folge wurde in einigen Gewässerabschnitten und vor allem im Bereich von Häfen eine Verlandungstendenz beobachtet (vgl. u.a. Pasche et al. 2010).

Mit einer Ausnahme ist allen Unterläufen der Status als Bundeswasserstraße bis heute erhalten geblieben, d.h. dass der Bund in Form der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für den Unterhalt zuständig ist. Die einzige Ausnahme bildet der Unterlauf der Oste, der seit dem 10.07.2012 den Status einer Landeswasserstraße inne hat (WSA Cuxhaven 2015).

### **1.3 Zielsetzung und Fragestellungen**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, wesentliche wasserbauliche Fragestellungen für ausgewählte Nebenflüsse der Unterelbe auf der Grundlage eines vertieften, umfassenden Systemverständnisses zu beantworten. Die Fragestellungen beziehen sich auf i) den Hochwasserschutz, ii) die Morphodynamik und die morphologische Entwicklung sowie iii) die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Morphodynamik. Die Beantwortung dieser Fragestellungen ist sowohl für die zuständigen wasserwirtschaftlichen Institutionen als auch für die Bewohner der Auen und der Einzugsgebiete der Nebenflüsse von besonderem Interesse. Dabei sind die beiden erstgenannten Fragestellungen aufgrund von aktuellen Geschehnissen, wie z.B. Überschwemmungen und abschnittsweise starken Verlandungen der Gewässersohle, von besonders hoher Bedeutung. Allerdings gewinnt auch die

dritte Fragestellung zu den Auswirkungen des Klimawandels mit dem Fortschreiten der Veränderungen der hydrologischen Rahmenbedingungen (u.a. Anstieg des mittleren Meeresspiegels) zunehmend an Bedeutung, da mittlerweile davon ausgegangen wird, dass sich diese Trends weiter fortsetzen und die aktuellen Probleme weiter verschärfen werden.

Eine fundierte Beantwortung der drei Fragestellungen erfordert aufgrund der vielfältigen Prozesse in den Nebenflüssen selbst sowie der komplexen Wechselwirkungen zwischen den Nebenflüssen und der Elbe ein umfassendes Systemverständnis. Der Stand des Wissens ist in dieser Hinsicht allerdings nur in Ansätzen vorhanden, d.h. für einzelne Nebenflüsse wurden ausgewählte Fragestellungen isoliert betrachtet. Dementsprechend verfügt diese Arbeit auch nicht über ein eigenständiges Kapitel, das den Stand des Wissens zum übergeordneten Systemverständnis im Bereich der Nebenflüsse der Unterelbe zusammenfasst.

Wesentliche Gründe für das fehlende übergeordnete Systemverständnis sind unter anderem eine stark eingeschränkte Datengrundlage und weitgehend fehlende Instrumente, die eine integrierte Betrachtung der hydrologischen, hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse ermöglichen. Zudem fokussieren bisherige Untersuchungen zur Vertiefung des Systemverständnisses ausschließlich die Unterelbe, die eine weitaus höhere wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung hat. Einige wenige Untersuchungen, wie z.B. (BFG 2008), (BFG 2014), behandeln einige Nebenflüsse der Unterelbe zumindest randständig. Die untergeordnete Bedeutung dieser Flüsse wird außerdem deutlich in der niedrigen Priorität im Rahmen der Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL). Ein weiterer Aspekt, der teilweise ein bedeutsames Hindernis darstellt, ist die oftmals vorhandene kleinteilige Organisationsstruktur der Zuständigkeiten für Einzugsgebiets-, Gewässer-, Hinterland- oder Deichabschnitte. Diese Diversifikation der Zuständigkeiten führt dazu, dass die Verantwortung für die vergleichsweise kleinen Nebenflüsse auf mindestens fünf Institutionen verteilt sein kann. Ein Extremfall stellt z.B. die Este dar, wo mehr als 10 Institutionen beteiligt sind (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Wasserwirtschaftliche Aufgaben und Zuständigkeiten an der Este**

Aufgabe	Lfd. Nr.	Zuständigkeit
Obere Wasser- und Deichbehörde: Gesetzgeberische Aufgaben (WHG, NWG) Umsetzung WR- RL und HWRM-RL	1	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Behörde für Umwelt und Energie (BUE)
	2	
Untere Wasserbehörde: Gewässerschutz und Gewässeraufsicht	3	Landkreis Harburg, Landkreis Stade, Bezirk Harburg
	4	
	5	
Unterhaltung des Gewässers oberhalb der Tidegrenze	6	Unterhaltungs- und Landschaftspflegeverband (ULV) Este
Unterhaltung des Gewässers inkl. Siele und Schöpfwerke unterhalb der Tidegrenze	7	Unterhaltungsverband (UHV) Altes Land (Nds.), Hauptentwässerungsverband der III. Meile des Alten Landes (HH)
	8	
Unterhaltung der Bundeswasserstraße und Betrieb des Inneren Este-Sperrwerks	9	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Hamburg
Betrieb des Äußeren Este- Sperrwerks	10	Hamburg Port Authority (HPA)
Unterhaltung der Deiche	11	Deichverband der II. Meile Alten Landes

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse schließen bestehende Wissenslücken und tragen grundlegend zur Entwicklung eines Systemverständnisses im Bereich der tidebeeinflussten Nebenflüssen der Unterelbe bei. Konkret wird das generierte Wissen dazu eingesetzt, um die eingangs erwähnten und nachfolgend im Detail erläuterten, Fragestellungen zu beantworten.

### i) **Statistische Einordnung seltener Schließereignisse im Unterlauf**

Viele der größeren Nebenflüsse der Unterelbe sind im Bereich ihrer Mündung mit einem Sturmflutsperrwerk versehen. Es ist Aufgabe der Sperrwerke höhere Wasserstände, wie z.B. im Fall von Sturmfluten in der Unterelbe, zu kehren. Allerdings führen die Sperrwerke nicht dazu, dass keinerlei Hochwassergefahr mehr besteht. Hinter den Sperrwerken kann es zu Hochwassersituationen kommen, wenn der Binnenabfluss während einer lange andauernden Sperrwerksschließung im Nebenfluss aufgestaut wird. Dies führt zu einem fortwährenden Anstieg des Binnenwasserstandes, der erst durch die Wiederöffnung bei Spiegelgleichheit von Binnen- und Außenwasserstand gestoppt wird, d.h. je länger die Sperrung, desto höher der Wasserstand. Lange Sperrzeiten werden vor allem durch Kettentiden, d.h. zwei oder drei Tiden, bei denen die Sperrwerke auch bei Tideniedrigwasser (Tnw) geschlossen bleiben, hervorgerufen. Der Gradient des Wasserspiegelanstiegs im Fall einer Sperrung hängt sowohl von dem Binnenabfluss als auch dem verfügbaren Stauraum binnenseitig des Sperrwerks ab und ist für jeden Nebenfluss eine individuelle Größe.

Die Ermittlung des maßgebenden Hochwasserstandes auf der Binnenseite der Sperrwerke erfordert zunächst eine Definition der maßgebenden Lastfallkombination aus Binnenzufluss und Schließdauer. Im Rahmen der Umsetzung der HWRM-RL, die von der Bundesregierung im Zuge der Novellierung in das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) übernommen wurde, ist zudem die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten erforderlich. Die Hochwassergefahrenkarten sollen Informationen zu Hochwasserereignissen unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit enthalten. Diese Karten sind auch für die tidebeeinflussten Abschnitte einiger<sup>3</sup> Nebenflüsse der Tideelbe zu erstellen. Um die Karten erstellen zu können, müssen relevante Hochwasserereignisse festgelegt und statistisch eingeordnet werden. Das gilt auch für die Lastfallkombination aus Binnenzufluss und Schließdauer.

Während zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für ein Binnenhochwasserereignis standardisierte und gut dokumentierte Verfahren existieren (DVWK 1999), gibt es zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für das kombinierte Auftreten eines Binnenhochwasserereignisses mit einer langandauernden Sperrwerksschließung bislang keine fachlich fundierte und zudem praxistaugliche Methode.

Im Rahmen der Berechnung von Überschwemmungsgebieten wurde für die meisten Nebenflüsse der Tideelbe eine Lastfallkombination zu Grunde gelegt. Diese setzt sich aus einem Zusammentreffen eines Binnenhochwassers mit einem Wiederkehrintervall von fünf bzw. zehn Jahren mit einer sturmflutbedingten Sperrwerksschließung über drei Sperrtiden zusammen. Eine nach dem Stand des Wissens berechnete Wahrscheinlichkeit wird für die Kombination nicht explizit angegeben. Stattdessen erfolgte zumeist eine Abschätzung auf der sicheren Seite. In der Konsequenz führt dies jedoch zu unnötig hohen Wasserständen, die wiederum unnötig hohe

---

<sup>3</sup> Stör, Krückau, Pinnau, Oste

Kosten für den Bau oder für die Ertüchtigung von Hochwasserschutzanlagen verursachen. Ein Teilziel dieser Arbeit ist es daher, eine Methodik zur Berechnung des Wiederkehrintervalls unterschiedlicher Lastfälle und Lastfallkombinationen zu entwickeln und diese beispielhaft anzuwenden.

## ii) **Morphodynamik und morphologische Entwicklung**

Die Berufsschiffahrt ist an nahezu allen Nebenflüssen der Unterelbe stark rückläufig. Dementsprechend wurde auch der Unterhaltungsaufwand angepasst. In diesem Zusammenhang wurde in den letzten Jahren die Frage aufgeworfen, wie die morphologische Entwicklung der Nebenflüsse unter reduzierten Unterhaltung voranschreiten wird. Im Allgemeinen wird zumindest abschnittsweise ein fortschreitender Verlandungstrend erwartet, denn aus der Praxis ist bekannt, dass aufgeweitete Abschnitte, wie z.B. Häfen oder der sperrwerksnahe Bereich, zu Auflandungen tendieren. Fundierte, generelle Aussagen zur morphologischen Entwicklung der tidebeeinflussten Unterläufe der Nebenflüsse existieren bislang jedoch nicht. Eine sehr allgemeine Aussage zur morphologischen Entwicklung der Nebenflüsse findet sich in (Entelmann und Gätje 2012). Sie schreiben diesbezüglich:

*„Aufgrund der Entwicklung in Nebenelben und Nebenflüssen (Aufsedimentationsprozesse, „Verschlickung“), des Anstiegs von Feinmaterialbaggerungen im Bereich des Hamburger Hafens sowie der Verschiebung von WSV-Baggererschwerpunkten für Feinmaterial nach weiter stromauf wird von einer Aufweitung der Trübungszone bzw. einer Zunahme des Schwebstoffgehaltes insbesondere an ihrem stromauf gelegenen Ende in den letzten Jahrzehnten ausgegangen. Die Veränderungen und die den Veränderungen zugrunde liegenden Wirkprozesse können jedoch nicht zufriedenstellend beschrieben werden, da keine hinreichenden Messdaten aus der Vergangenheit zur Verfügung stehen. Grundlegende quantitative Fragen zum Feinsedimenthaushalt der Tideelbe sind nicht ausreichend beantwortet“*

Die Autoren gehen demnach davon aus, dass die Nebenflüsse tendenziell verlanden. Die Intensität, mit der die Verlandungen voranschreiten, ist allerdings ebenso unklar wie die genauen Wirkprozesse.

Eine signifikante Verlandung in den Nebenflüssen hätte vor allem weitreichende Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Grundsätzlich führt eine Verlandung der Gewässersohle zu einer Reduktion des abflusswirksamen Querschnittes und begünstigt damit einen Anstieg des Tideniedrigwassers. Dies hat wiederum negative Auswirkungen auf die Vorflutverhältnisse im Nebenfluss. Da die Entwässerung der tiefliegenden Gebiete maßgeblich von den Wasserständen im Vorfluter abhängt, wäre in diesem Fall mit einer Verschlechterung der Entwässerungssituation zu rechnen. In der Folge wäre ein weiterer Ausbau der Schöpfwerkskapazitäten erforderlich, was wiederum hohe Kosten verursachen würde.

Die morphologische Entwicklung wird u.a. durch die Tide- und Sedimentdynamik der Elbe sowie durch den Abfluss und die Schwebstoffzufuhr aus dem Einzugsgebiet beeinflusst. Auch der Betrieb der wasserwirtschaftlichen Anlagen, wie z.B. Schöpfwerke und Sperrwerke, haben einen Einfluss auf die morphologische Entwicklung.

Für die Krückau führte Donner Untersuchungen zum Einfluss von Sperrwerksschließungen bei niedrigen und hohen Oberwasserzuflüssen durch und zeigte mit Hilfe von hydrodynamisch-

numerischen Modellrechnungen, dass Sperrwerksschließungen tendenziell Auflandungen begünstigen, bzw. die Erosion reduzieren (Donner 2014). Außerdem wurden kurzfristige morphologische Änderungen der Krückau auf der Grundlage von Fächerecholotpeilungen beschrieben. Allerdings war der zugrunde gelegte Datensatz zu kurz, um mittel- oder langfristige Trends oder gar komplexere Zusammenhänge abzuleiten. Genau dies ist ein weiteres Teilziel dieser Arbeit. Hierfür ist zunächst das Systemverständnis hinsichtlich der morphologischen Entwicklung der Unterläufe zu verbessern. Dazu muss diese möglichst exakt erfasst und beschrieben werden. Anschließend sind relevante Einflussfaktoren zu identifizieren. Dazu sind zum einen langjährige Messzeitreihen auszuwerten und zu analysieren. Zum anderen sind systematische Modelluntersuchungen (Sensitivitätsstudien) zum Einfluss der äußeren Rahmenbedingungen (Tide, Oberwasserzufluss, Schwebstoffkonzentration) und von Parametrisierungen (Rauheit, Sinkgeschwindigkeit, kritische Schubspannungen) auf die Dynamik des Schwebstofftransportes erforderlich.

### iii) Mögliche<sup>4</sup> Auswirkungen des Klimawandels

In der Fachwelt gilt es mittlerweile als gesichert, dass anthropogene Emissionen von Treibhausgasen die Entwicklung des weltweiten Klimas beeinflussen (Stocker et al. 2013). Selbst wenn das Zwei-Grad-Ziel, dem sich die internationale Politik verschrieben hat, erreicht werden sollte, sind für Europa steigende mittlere Temperaturen, extremere Höchsttemperaturen im Sommer sowie häufigere und intensivere Starkregenereignisse zu erwarten (Vautard et al. 2014). Dies gilt auch für den Bereich Norddeutschland (ebd.). Die veränderten Rahmenbedingungen werden sich u.a. auf das Abflussgeschehen, die Wasserstände und auf den Schwebstofftransport in den Flüssen auswirken. Eine Folge des globalen Anstiegs der mittleren Temperatur ist der Anstieg des globalen Meeresspiegels (Stocker et al. 2013). Dieser wird sich über die Nordsee und die Ästuar bis in die Nebenflüsse ausbreiten und vor allem zu einer veränderten Tide- und Sedimentdynamik führen.

Vor diesem Hintergrund wird die Frage aufgeworfen, in welcher Ausprägung sich die Veränderungen in den Nebenflüssen zeigen werden. Eine frühzeitige Einschätzung der möglichen zukünftigen Situation ist aus wasserwirtschaftlicher und hochwasserschutztechnischer Sicht unbedingt erforderlich, um ausreichend Zeit zur Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zu haben.

Voraussetzung zur Einschätzung zukünftiger Situationen ist die Kenntnis der Entwicklung des zukünftigen Klimas. In diesem Bereich gab es im Bereich der Forschung vor allem im vergangenen Jahrzehnt deutliche Fortschritte, so dass die erforderliche Wissens- und Datengrundlage bezüglich der treibenden Prozesse sowie die erforderliche Modelltechnik mittlerweile zur Verfügung stehen. Mit Hilfe von Regionalen Klimamodellen kann die unter Annahme definierter Szenarien zu erwartende Veränderung der Klimaparameter bestimmt werden. Für Mitteleuropa liegen mittlerweile die Ergebnisse mehrerer Rechenläufe in

---

<sup>4</sup> Die Formulierung „mögliche Auswirkungen“ ist darauf zurückzuführen, dass sowohl die Änderung der Klimaparameter als auch die Größenordnung der Änderung des Meeresspiegels auf Grund verschiedener Unsicherheitsfaktoren nicht vorhersagbar ist. Dementsprechend ist auch das Ausmaß der Folgen nicht vorhersagbar. Allerdings ist es möglich die Auswirkungen im Rahmen der zu erwartenden Bandbreiten zu ermitteln.

vergleichsweise hoher räumlicher (rd. 10x10km) und zeitlicher Auflösung (1h) vor. Diese Datengrundlage ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen auf kleine Flusseinzugsgebiete wie die der Nebenflüsse der Unterelbe, die sich im Allgemeinen durch kurze Reaktionszeiten auszeichnen.

Bezüglich des globalen Meeresspiegelanstiegs existiert mittlerweile ebenfalls eine Vielzahl an Studien, die Angaben bezüglich des zu erwartenden Anstiegs bis zum Jahr 2100 und darüber hinaus machen. Außerdem existieren einige Studien, aus denen der zu erwartende Meeresspiegelanstieg in der Nordsee abgeleitet werden kann. Eine darauf aufbauende Systemanalyse zur Reaktion der Tideelbe auf verschiedene Szenarien zum Meeresspiegelanstieg (Holzwarth et al. 2011) bildet eine gute Ausgangslage für Untersuchungen an den Nebenflüssen.

Erste Erkenntnisse bezüglich der Auswirkungen auf den Hochwasserschutz und möglichen Anpassungsmaßnahmen an Nebenflüssen der Unterelbe wurden von (Nehlsen et al. 2014) am Beispiel der Krückau dargestellt. Die Grundlage für die präsentierten Ergebnisse bilden umfassende, detaillierte Untersuchungen mit Hilfe hydrologischer und hydrodynamisch-numerischer Modelle. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden weitere und tiefergehende Erkenntnisse für die Nebenflüsse der Unterelbe dargestellt. Die Grundlage hierfür bilden detaillierte Untersuchungen am Beispiel der Krückau und der Este. Die Schwerpunkte der Untersuchungen liegen dabei zum einem im Bereich des Hochwasserschutzes und zum anderen im Bereich der Dynamik des Schwebstofftransportes. Ein Ziel im Rahmen dieser Arbeit ist die Beschreibung der Auswirkungen der veränderten Rahmenbedingungen auf hydrologische sowie morphodynamische Prozesse sowie auf den Hochwasserschutz.

#### **1.4 Vorgehensweise**

Im nachfolgenden Kapitel 2 werden die gewählte Methodik der wasserbaulichen Systemanalyse sowie relevante Grundlagen zur Erhebung von Daten in der Natur und zur numerischen Modellierung dargestellt. Da die Unterläufe der Nebenflüsse maßgeblich durch die Tide- und Sedimentdynamik der Unterelbe geprägt werden, wird in Kapitel 3 das relevante Wissen zum Ist-Zustands der Unterelbe zusammengefasst. Anschließend erfolgt in Kapitel 4 zunächst eine detaillierte Beschreibung der hydrologischen, hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse und Größen. Auf dieser Grundlage werden die ersten beiden Fragestellungen beantwortet, die sich auf den Hochwasserschutz sowie die Morphodynamik beziehen. Der dritten Fragestellung, die sich auf die Auswirkungen des Klimawandels bezieht, ist aufgrund der Thematik und des Umfangs ein eigenes Kapitel 5 gewidmet. In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen zum Klimawandel und zum Meeresspiegelanstieg zusammengetragen, bevor die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Abfluss, den Hochwasserschutz und die Morphodynamik beschrieben werden. In Kapitel 6 erfolgen Synthese und Interpretation der wesentlichen Erkenntnisse. Kapitel 7 beschließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick.

## 2. Methodik

Die im Rahmen dieser Arbeit zu beantwortenden Fragestellungen im Bereich der Nebenflüsse der Unterelbe setzen ein weitreichendes Systemverständnis der hydrologischen, hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse sowie deren Wechselwirkungen voraus. Zur Generierung dieses Systemverständnisses wird eine Methodik angewandt, die als wasserbauliche Systemanalyse bezeichnet wird. Aufgrund einer fehlenden eindeutigen Definition wird der Begriff zunächst einführend beschrieben. Anschließend werden eine Definition und die erforderlichen Arbeitsschritte abgeleitet und im Detail beschrieben.

### 2.1 Wasserbauliche Systemanalyse

Die *Systemanalyse* hat ihren Ursprung im Gebiet der Systementwicklung, wo sie einen wichtigen Prozess bei der Entwicklung und/oder der Verbesserung von Systemen darstellt. Die Definition des Begriffs ist sehr weitläufig und bietet viel Interpretationsspielraum. Nach Heinrich kann die Systemanalyse entweder als gesamter Entwicklungsprozess oder als Teilprozess in einer frühen Phase der Entwicklung verstanden werden (Heinrich 2007). Außerdem kann bei der Systemanalyse ein System beschrieben werden, wie es in der Realität abgebildet ist (Ist-Analyse), oder es kann ein zu erstellendes System beschrieben werden (Soll-Analyse) (Rupp 2013). Dieses prinzipielle Vorgehen wurde für ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen übernommen. Die Methodik wird hier vor allem bei der Bearbeitung von komplexen hydrologischen, hydrodynamischen oder morphodynamischen Fragestellungen an Fluss- oder Ästuarsystemen eingesetzt. Die Bezeichnung *Systemanalyse* wurde im Rahmen der Untersuchungen übernommen und in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Untersuchung bzw. Fachrichtung um den Zusatz *hydrologisch* oder *wasserbaulich* ergänzt.

Die richtige Begriffswahl kann dem allgemeinen Verständnis des Wasserbaus folgend getroffen werden. In diesem Verständnis wird die Hydrologie als eines von mehreren Arbeitsfeldern des Wasserbaus betrachtet. Weitere Arbeitsfelder sind z.B. der Schutz (Hochwasserschutz, Küstenschutz, etc.) und die Unterhaltung (Gewässerunterhaltung, etc.). Entsprechend der im Rahmen dieser Arbeit definierten Fragestellungen mit Bezug auf die Hydrologie, den Hochwasserschutz und die Morphodynamik ist also die Bezeichnung „*wasserbauliche Systemanalyse*“ treffend.

Eine einheitliche Definition des Begriffs *wasserbauliche Systemanalyse* existiert im Rahmen von ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen genauso wenig wie eine eindeutige Beschreibung der Vorgehensweise. Stattdessen sind die Angaben im Schrifttum sehr vage. Maniak beschreibt den Begriff *Systemanalyse* in einem hydrologischen Kontext als „...Identifikation und Beschreibung des realen Modells und die Untersuchung des Systemverhaltens unter verschiedenen Bedingungen.“ und beschreibt damit die Ist-Analyse (Maniak 2001).

Vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Hamburg sowie der Hamburg Port Authority (HPA) wird der Begriff „*wasserbauliche Systemanalyse*“ beschrieben als systematische Untersuchung von Einflussgrößen hinsichtlich ihrer Sensitivität auf das Gesamtsystem auf der Grundlage eines Ersatzsystems (WSA Hamburg und HPA 1996). Dabei wird das Ersatzsystem durch ein hydrodynamisch-numerisches Modell eines Ästuars dargestellt. Da zum Zustand des

Systems keine vertiefenden Angaben gemacht werden, ist davon auszugehen, dass sowohl ein Ist-Zustand als auch ein Soll-Zustand die Grundlage bilden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff wasserbauliche Systemanalyse in Anlehnung an (WSA Hamburg und HPA 1996) wie folgt definiert:

Bei der wasserbaulichen Systemanalyse handelt es sich um einen Ansatz zur systematischen modellbasierten Analyse von Einflussgrößen hinsichtlich ihrer Sensitivität auf ein Gesamtsystem zum Zweck der Ableitung von Aussagen zum Systemverhalten. Der Systemzustand kann dabei entweder dem aktuellen Zustand (Ist-Analyse) oder einem zukünftigen Zustand (Soll-Analyse) entsprechen. Als Modell dient entweder ein statistisches oder ein hydrodynamisch-numerisches Modell.

Die Untergliederung in einzelne Arbeitsschritte erfolgt in Anlehnung an (Engelen und Kloosterman 1996) wie folgt:

1. Allgemeine Systembeschreibung
2. Datenaufnahme und -prozessierung
3. Modellierung (statistisch oder dynamisch)
4. Sensitivitätsstudien
5. Interpretation der Ergebnisse.

Die allgemeine Systembeschreibung liefert eine überblicksartige Darstellung der wesentlichen Charakteristiken, wie z.B. naturräumliche Gegebenheiten und grundlegende hydrologische, hydrodynamische sowie morphodynamische Prozesse. Sie bildet den Rahmen für die präzise Formulierung der Fragestellungen und die weiteren Untersuchungen. Die nachfolgenden Kapitel 3 (Untere Elbe) und 4 (Nebenflüsse der Untere Elbe) beginnen jeweils mit einer allgemeinen Systembeschreibung. Daran anschließend werden die Ergebnisse der Arbeitsschritte zwei bis fünf dazu genutzt, um die definierten Fragestellungen zu beantworten. Die wesentlichen Grundlagen der einzelnen Schritte der wasserbaulichen Systemanalyse werden in den nachfolgenden Unterabschnitten 2.2 und 2.3 zusammengefasst.

## **2.2 Datenaufnahme und -aufbereitung**

An den tidebeeinflussten Nebenflüssen der Untere Elbe stehen viele gewässerkundliche und einige revierkundliche Daten zur Verfügung. Gewässerkundliche Daten sind u.a. gemessene Zeitreihen von Wasserständen, Abflüssen, Strömungen, Trübungen oder Schwebstoffkonzentration, die in der Regel punktuell erhoben werden. Für die betrachteten Nebenflüsse liegen hauptsächlich Zeitreihen des Wasserstandes und des Abflusses vor, die an Pegeln aufgezeichnet wurden. Diese werden in den Oberläufen durch die Wasserbehörden der Länder (NLWKN, LKN-SH) und in den Unterläufen durch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) betrieben und gewartet. Oft reichen die Zeitreihen einige Jahrzehnte zurück. Vereinzelt liegen für die Unterläufe außerdem punktuell temporäre Strömungs- oder Schwebstoffdaten vor.

Revierkundliche Daten sind z.B. das Sedimentinventar oder die Unterwassertopographie, die punktuell, linienhaft oder flächig erhoben werden. Für die Nebenflüsse der Untere Elbe sind in der

Regel nur vereinzelt punktuelle Informationen zum Sedimentinventar vorhanden. Für einige Nebenflüsse liegen Peilungen der Gewässertopographie in Form von Querschnitten, Längsschnitten oder flächenhaften Datensätzen vor. Allerdings werden detaillierte Analysen oftmals durch die schlechte Qualität der Datengrundlage verhindert. Gründe für die schlechte Qualität sind u.a. inkonsistente Messbereiche (Messbereich nicht von Böschungsoberkante bis Böschungsoberkante), mangelhafte Datendichte (nur wenige Querprofilmessungen für den Referenzzustand) und die Beeinflussung durch Unterhaltungsmaßnahmen.

Um eine ausreichende Datengrundlage in der nötigen Qualität zu erhalten, wurden im Rahmen dieser Dissertation zusätzliche Messungen in der Natur durchgeführt. In den folgenden Abschnitten werden die Messverfahren und die Aufbereitungsmethoden erläutert.

## **2.2.1 Schwebstoffmessungen in der Natur**

### **2.2.1.1 Messverfahren**

Die in-situ-Erfassung der Schwebstoffkonzentration erfolgt indirekt über die Messung der Trübung. Hierzu kommen in der Regel Optical Backscatter (OBS) Sonden zum Einsatz, die nach dem Streulichtprinzip arbeiten. Eigens für die Messungen wurden am Institut für Wasserbau der TU Hamburg Sonden konstruiert, die speziell auf die vorherrschenden Verhältnisse an der Tideelbe und deren Nebenflüsse abgestimmt sind. Jede dieser Sonden besteht aus zehn einzelnen Sensoren, die über eine Länge von einem Meter in ein Edelstahlgehäuse eingelassen und vergossen sind. Die Messtechnik ist in einem wasserdichten Gehäuse an der Oberseite der Sonde untergebracht. Die Energieversorgung erfolgt über einen wiederaufladbaren Energiespeicher (Akku). Die Messwerte werden in einer Frequenz von einem Hertz erfasst und auf einem digitalen Speichermedium (SD-Karte) gespeichert. Die Sensoren bestehen jeweils aus einer Infrarot-Laser-Diode (Sender/Signalgeber) sowie einem Fototransistor (Empfänger). Sender und Empfänger sind in einem definierten Winkel zueinander angeordnet, wodurch ein definiertes Messvolumen entsteht. Dieses Messvolumen unterscheidet sich aufgrund leicht variierender Anordnung von Sensor zu Sensor.

Die ausgesendeten Infrarot-Strahlen werden von den im Wasser vorhandenen Schwebstoffen reflektiert und anschließend vom Fototransistor empfangen. Das schwache Signal wird mit Hilfe eines Operationsverstärkers verstärkt und zurück an den Mikroprozessor gegeben. Da der Empfänger bereits auf das natürlich vorherrschende Umgebungslicht reagiert, werden für jeden Zeitschritt jeweils ein Hell- (Umgebungslicht mit Laserdiode) und ein Dunkelwert (Umgebungslicht ohne Laserdiode) gemessen. Den entsprechenden Trübungswert erhält man somit durch Subtraktion des Dunkelwertes vom Hellwert. Die ausgegebenen Werte beziehen sich nicht auf physikalische Einheiten, sondern stellen jeweils digitale Werte dar (12 bit entsprechen 4096 Messwerte im Bereich 0 bis 4095). Je höher der Messwert, desto stärker ist die Trübung im Gewässer. Ein Messwert von 0 bedeutet also keine Trübung, ein Messwert von 4095 hingegen Totalreflexion. Ein Nachteil dieses Messverfahrens ist, dass das Ansprechverhalten des Sensors stark von der Art der vorhandenen Schwebstoffe abhängt.

„Kleine Korngrößen verursachen einen relativ hohen Trübungswert bei vergleichsweise kleiner Masse, während gröbere Körner aufgrund der kleineren spezifischen Oberfläche relativ geringe Trübungen hervorrufen.“ (Habersack 2008).

Battisto zeigt, dass das Backscatter-Signal von Ton mit einem mittleren Korndurchmesser von 2 Mikrometer 50-mal stärker ist als jenes von Sand mit einem mittleren Korndurchmesser von 100  $\mu\text{m}$  (Battisto et al. 1999). Hieraus lässt sich schließen, dass für jede Sonde eine Kalibrierung mit dem im Untersuchungsgebiet vorhandenen Schwebstoffen durchzuführen ist. Erst dadurch können fundierte Schlüsse von den gemessenen Trübungswerten auf die Schwebstoffkonzentrationen gezogen werden. Als Ergebnis der Kalibrierung erhält man charakteristische Kalibriergeraden für verschiedene Schwebstoffkonzentrationen (Abbildung 2).

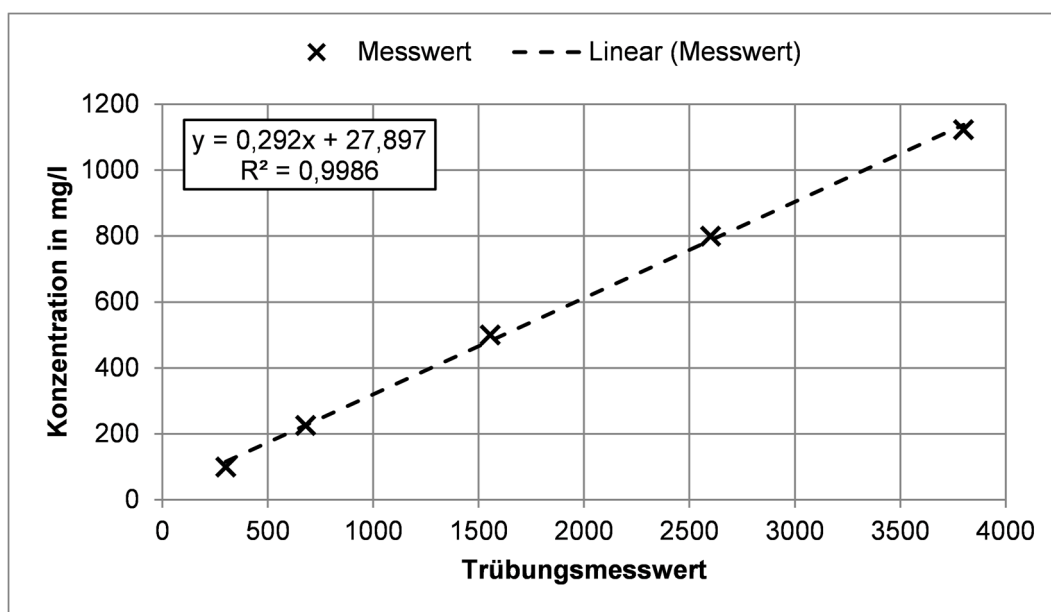


Abbildung 2: Beispielhafte Kalibriergerade für OBS Sonden

### 2.2.1.2 Durchgeführte Messkampagnen

Im Sommer 2014 wurden im Bereich der Mündungssperrwerke von Este und Krückau Trübungsmessungen durchgeführt. Während der Messungen herrschte überwiegend eine stabile Hochdruck-Wetterlage mit geringen Windgeschwindigkeiten und ohne nennenswerte Niederschläge. Der Oberwasserabfluss der Elbe am Pegel Neu Darchau war in den Monaten vor den Messungen sehr niedrig und erreichte lediglich Werte deutlich unterhalb des MQ von  $Q = 710 \text{ m}^3/\text{s}$ . Anfang Juni stieg der Abfluss für einige Tage auf Werte von knapp  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ . Anschließend sank der Abfluss bis zum Ende der Messungen auf rund  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  ab.

An jedem Standort wurde suspendiertes Material entnommen und für jeden Sensor unter Laborbedingungen eine Kalibrierfunktion bestimmt. Das Verfahren, mit dem die Kalibrierfunktion ermittelt wurde, entspricht den Empfehlungen von (Habersack 2008). Das suspendierte Material in den untersuchten Abschnitten weist kohäsive Eigenschaften auf. Auch wenn der Salzgehalt unter 2 PSU liegt, können Flockungsprozesse eine Rolle spielen. Im Rahmen der Kalibrierung im Labor können die Flocken auf Grund verschiedener Einflüsse (Transport, Lagerung, Förderung durch die Versuchseinrichtung) zerstört werden, wodurch die Eigenschaften

der Flocken verändert und die Kalibriergeraden verfälscht würden. Aus diesem Grund wurden im Verlauf der Messungen in der Natur mehrere Schöpfproben in unmittelbarer Nähe der Trübungssonden entnommen und deren Schwebstoffgehalt im Labor bestimmt. Die Gegenüberstellung der ermittelten Schwebstoffkonzentrationen mit jener aus der optischen Messung unter Anwendung der Kalibriergeraden ermittelten zeigte insgesamt eine gute Übereinstimmung der Werte.

Optische Signale verhalten sich über eine große Bandbreite weitgehend linear zur Schwebstoffkonzentration (Maushake 2007), wodurch das Verfahren für den Einsatz an den betrachteten Nebenflüssen besonders geeignet ist, denn aus den Messungen in der Elbe ist bekannt, dass die Schwebstoffkonzentration im Tideverlauf deutlich schwankt, weshalb durch das Messverfahren eine große Bandbreite abzudecken ist.

## 2.2.2 Fächerlotpeilungen in der Natur

### 2.2.2.1 Messverfahren

Die flächige Vermessung der Gewässersohle im schiffbaren Bereich der betrachteten Nebenflüsse erfolgt durch das institutseigene Messboot Nekton. Dieses ist mit dem Multibeam-Echolot (Fächerecholot) SeaBeam 1185 der Firma L-3 Communications ELAC Nautik GmbH ausgestattet. Das System besteht aus zwei Wandlerplatten, die in den Schiffsrumpf integriert sind und einer Sonar-Prozessor-Einheit. Insgesamt werden 126 Einzelstrahlen im Abstand von  $1,5^\circ$  ausgesandt, so dass ein Gesamtwinkel von  $153^\circ$  abgedeckt werden kann. Die Messfrequenz von 180 kHz eignet sich für den Einsatz in flachen Gewässern.

Da die Schallgeschwindigkeit stark von Temperatur und Salzgehalt des Wassers abhängt, werden diese Parameter im Laufe jeder Messung mehrfach bestimmt<sup>5</sup>. Aus den über die Tiefe aufgezeichneten Werten wird ein Schallprofil ermittelt, das in die Berechnung der Laufzeit des Schallimpulses einfließt. Die Schiffsbewegungen werden von einem Bewegungssensor und einem Kreiselkompass erfasst. An Bord der Nekton befindet sich ein hochgenauer optischer Kreiselkompass vom Typ Octans III der Firma IXSEA. Durch die direkte Übermittlung der Daten des Bewegungssensors an die Sonar-Prozessor-Einheit des Fächerecholots werden die Messdaten in Echtzeit um die Schiffsbewegungen Roll und Pitch bereinigt. Die genaue Position des Schiffes wird per DGPS<sup>6</sup> ermittelt. Die Daten zur Korrektur der per GPS bestimmten Position, stammen von einer festen Landstation, die mit einer Aktualisierungsrate von 10 Hz per Funk Positionsdaten sendet, so dass die Messdaten in Echtzeit korrigiert werden können. Plöger führte eine Kalibrierung des Messsystems auf der Grundlage dynamischer Tests durch (Plöger 2007), die Albers mit dem gleichen guten Ergebnis wiederholte (Albers 2012).

---

<sup>5</sup> Bis zum Jahr 2013 wurde zur Messung der Schallgeschwindigkeit eine CTD Sonde vom Typ 48M der Firma Sea&Sun eingesetzt. Ab 2013 wurde diese durch eine CTD Sonde vom Typ 75M der Firma Sea&Sun ersetzt.

<sup>6</sup> Differential Global Positioning System

Den Fehler des Gesamtsystems exakt anzugeben ist auf Grund der Vielzahl der einzelnen Komponenten des Systems nicht möglich. Als wesentlicher Einflussfaktor ist die GPS-Ortung zu nennen. Nach Albers beläuft sich die absolute Messungenauigkeit bei Wassertiefen bis zu fünf Metern im ungünstigsten Fall auf 7 bis 10 cm (Albers 2012). Bei entsprechender Mittelung, z.B. bei der Rastererzeugung, wird der Fehler bei einer hohen Anzahl an Werten je Zelle relativiert.

Die International Hydrographic Organization (IHO) definiert in den *IHO Standards for hydrographic surveys* Mindestanforderungen für die Genauigkeit von hydrographischen Messungen (International Hydrographic Organization 2008). Das beschriebene Fächerecholotsystem der Nekton übersteigt die strengsten Anforderungen (Genauigkeit kleiner als 0,25 m bei 5,0 m Wassertiefe) deutlich.

Aufgrund des geringen Tiefgangs der Nekton von 0,6 m können auch sehr flache Gewässerabschnitte vermessen werden. Aus der praktischen Erfahrung geht hervor, dass ab einer Wassertiefe von 1,5 m brauchbare Messergebnisse erzielt werden, die weitgehend unbeeinflusst von Fehlmessungen sind. Da die Messungen zum Zeitpunkt des Tidehochwassers erfolgen, kann die Sohle auch in ufernahen Böschungsbereichen erfasst werden.

### 2.2.2.2 Durchgeführte Messkampagnen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Unterwassertopographie der schiffbaren Unterläufe von Krückau und Este in 21 Messkampagnen per Fächerecholot vermessen. Für die Krückau stehen zehn Datensätze zur Verfügung, die jährlich im November der Jahre 2006 bis 2015 aufgenommen wurden. Hinzu kommen vier Datensätze für den Mai der Jahre 2008, 2013, 2014 und 2015. Für die Este stehen sieben Datensätze zur Verfügung, die in den Jahren 2009 - 2015 jährlich im Mai aufgenommen wurden.

Um die hohe Qualität der Daten zu gewährleisten und damit die bestmögliche Vergleichbarkeit der Datensätze untereinander zu erhalten, wurden die Messungen stets mit derselben Gerätekonfiguration unter Verwendung derselben Einstellung der Geräteparameter, z.B. Frequenz des Fächerecholots durchgeführt. Außerdem erfolgte die Auswertung stets in der gleichen Art und Weise. Die Bereinigung der Datensätze von Messfehlern erfolgt in einer dreistufigen Prozedur. In der ersten Stufe erfolgt eine Plausibilisierung der vom Kreiselkompass aufgenommenen Korrekturparameter Heave, Roll und Pitch und der Tidenkorrektur. In der zweiten Stufe werden vermeintliche Ausreißer entfernt, die aus Messfehlern resultieren. Ursachen für Messfehler sind u.a.:

- plötzlicher, kurzfristiger Verlust der Lagegenauigkeit,
- Luftbläschen oder schwimmende Gegenstände unmittelbar vor den Schallwandlerplatten
- Nebenkeulen (nicht in die gewollte Richtung abgestrahlte Signale)
- Mehrfachreflexionen.

Dies geschieht zum Teil automatisch, indem Messwerte anhand bestimmter Kriterien, wie z.B. Qualität der Lage- und Höhengenaugigkeit, gefiltert werden. Ausreißer, die nicht von Filtern erfasst werden, werden manuell entfernt. In der dritten Stufe werden Ausreißer über statistische Filter detektiert. Diese Filter werden einerseits profilweise und andererseits flächig auf

Rasterbasis mit verschiedenen Auflösungen angewandt. Die Erfahrungen aus den durchgeführten Messkampagnen an den Nebenflüssen der Tideelbe zeigen, dass der Anteil der eliminierten Ausreißer zwischen etwa acht und fünfzehn Prozent liegt. Zuletzt erfolgte die Rasterung der Datensätze auf ein hochaufgelöstes regelmäßiges Raster von 1 mal 1 Meter. Dabei liegen die Zellmittelpunkte der Raster aus den unterschiedlichen Jahren stets exakt übereinander, um die Vergleichbarkeit zu Datensätzen aus anderen Jahren zu erhalten. Ein weiteres Hilfsmittel zur Analyse von kleineren Strukturen ist die 3D-Visualisierung. Abbildung 3 vermittelt einen Eindruck über den Detaillierungsgrad der aufbereiteten Messdaten. Kleinteilige Sohlstrukturen sind gut zu erkennen.

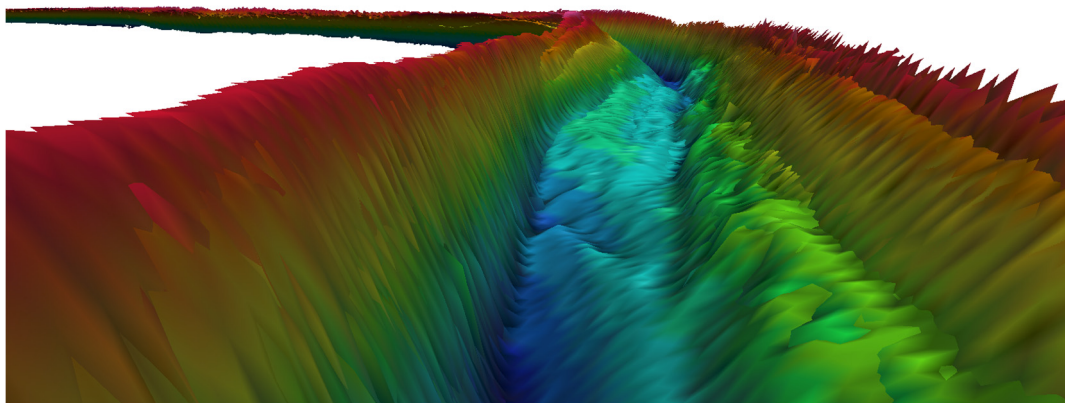


Abbildung 3: 3D Darstellung der aufbereiteten Fächerlotdaten am Beispiel der Krückau

### 2.3 Integrierte Modellierung

Die ganzheitliche, integrierte Betrachtung der hydrologischen, hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse erfolgt im Rahmen der durchgeführten wasserbaulichen Systemanalyse auf der Grundlage von hydronumerischen Modellergebnissen. Um diese zu erhalten ist der Einsatz unterschiedlicher, gekoppelter Modelltypen erforderlich. Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Konzept zur integrierten Modellierung ist in Abbildung 4 dargestellt. Die beispielhafte Umsetzung erfolgte für die beiden ausgewählten Nebengewässer Este und Krückau.

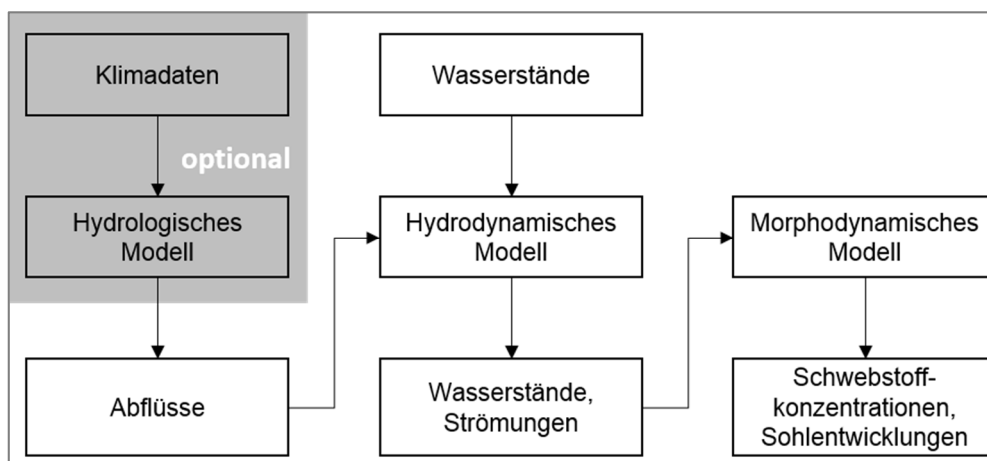


Abbildung 4: Konzept der Modellkette zur integrierten Modellierung

Für beide Flusseinzugsgebiete wurde jeweils ein Niederschlag-Abfluss-Modell (N-A-Modell) aufgebaut. Die mit den N-A-Modellen durchgeführten Simulationen werden von gemessenen oder simulierten Klimadaten angetrieben und liefern als Ergebnis u.a. den Abfluss im Gewässer. Anhand von gemessenen Abflüssen werden die Modelle kalibriert und validiert. Anschließend können die Modelle u.a. dazu eingesetzt werden, um an jeder beliebigen Stelle im Gewässer den Abfluss zu berechnen oder um gemessene Abflusszeitreihen zu verlängern bzw. Lücken zu schließen. Außerdem können die N-A-Modelle eingesetzt werden, um die Auswirkungen des zukünftigen Klimas zu analysieren. Dazu werden sie mit Klimadaten angetrieben, die von Klimamodellen berechnet wurden. Mittlerweile steht eine ganze Reihe von Modellergebnissen unterschiedlicher regionaler Klimamodelle zur Verfügung (vgl. Abschnitt 5.1).

Die gemessenen oder simulierten Abflüsse werden an definierten Schnittstellen an die hydrodynamisch-numerischen Modelle der Unterläufe übergeben und beschreiben dort die oberen Randbedingungen. Weiterhin ist für jedes Modell mindestens eine weitere Randbedingung am unteren Modellrand erforderlich. Im vorliegenden Fall bietet sich die Vorgabe eines Wasserstands an, da an den Mündungen von Este und Krückau Wasserstandszeitreihen aus Pegelmessungen zur Verfügung stehen.

Mit Hilfe der hydrodynamisch-numerischen Modelle werden Strömungen und Wasserstände berechnet. Die berechneten hydrodynamischen Größen dienen als Eingangsgrößen für ein morphodynamisch-numerisches Modell, dessen Ausdehnung kongruent zur Ausdehnung des hydrodynamisch-numerischen Modells ist. Dieses Modell berechnet den Schwebstofftransport im Gewässer sowie die Höhenänderung der Gewässersohle. Alle berechneten Größen stehen für weiterführende Analysen zur Verfügung.

### **2.3.1 Niederschlag-Abfluss-Modellierung**

Zur Beantwortung der definierten Fragestellungen werden hydrologische Größen, wie der Abfluss im Gewässer, auf der Grundlage von hydrologisch-numerischen Modellen berechnet. In die Auswahl der entsprechenden hydrologischen Modellierungsmethode sind neben der Anforderung der hohen zeitlichen Auflösung der Ergebniszeitreihen vor allem die Charakteristiken des Einzugsgebietes, wie z.B. Größe, Topographie, Gewässernetz und Flächennutzung, einzubeziehen. Die betrachteten Einzugsgebiete der Oberläufe von Este und der Krückau sind vergleichsweise klein. Das profilierte Gelände im Bereich der Geest weist zumeist ein deutliches Gefälle in Richtung des Gewässernetzes auf. Die Oberläufe von Este und Krückau werden von vielen kleineren Bächen gespeist, die jeweils ihre Teileinzugsgebiete entwässern.

Die Flächennutzung setzt sich im Wesentlichen aus Wald, Grünland und Ackerland zusammen, die einen Anteil von über 80% der gesamten Flächennutzung ausmachen. Über die Einzugsgebiete verteilt sind kleinere und größere Siedlungsflächen, die größtenteils einen hohen Versiegelungsgrad aufweisen. Insgesamt machen die Nutzungsarten Gebäude- und Freiflächen sowie Verkehrsflächen weniger als 15% aus. Eine versiegelte Oberfläche führt dazu, dass ein Großteil des Niederschlagswassers als Direktabfluss abgeführt wird. Vor allem im Bereich von neueren Baugebieten sind zum Rückhalt des Direktabflusses von den versiegelten Flächen Hochwasserrückhaltebecken vorgesehen.

Zur bestmöglichen Abbildung der beschriebenen Charakteristiken und Erfüllung der Anforderungen an die räumliche und zeitliche Diskretisierung eignet sich ein Ansatz aus der Gruppe der Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle). Innerhalb der Gruppe der N-A-Modelle wird entsprechend des Modellierungsansatzes zwischen stochastischen und deterministischen Modellen unterschieden. Stochastische Modelle beschreiben Zusammenhänge auf der Grundlage von Häufigkeitsverteilungen. Die Kausalität der beschriebenen Zusammenhänge muss nicht zwangsläufig gegeben sein. Deterministische Modelle basieren hingegen auf den Beziehungen von Ursache und Wirkung. Sie beschreiben die physikalischen Prozesse in der Natur so exakt wie möglich durch mathematische Gleichungen.

Dementsprechend eignen sich für die Zielsetzungen im Rahmen dieser Arbeit deterministische Modelle. Ein geeignetes deterministisches Modell, welches die Anforderungen erfüllt, wird nachfolgend vorgestellt.

### 2.3.1.1 Modellverfahren KalypsoHydrology

KalypsoHydrology ist ein deterministisches, detailliertes nichtlineares hydrologisches Modell zur Simulation der Prozesse des landgebundenen Teils des globalen Wasserkreislaufes. Hierbei werden die Teilprozesse Schneespeicherung, Evapotranspiration, Bodenwasserspeicherung, Grundwasserneubildung, Oberflächenabfluss, Interflow, Grundwasserabfluss und Wellentransport im Gerinne berücksichtigt (Pasche 2004).

Das Modell löst wie alle Niederschlag-Abfluss-Modelle die Wasserbilanzgleichung der Landoberfläche.

$$N = A + V \pm \Delta S \quad (2-1)$$

Der Ansatz von KalypsoHydrology sieht zur Ermittlung der Reaktion eines Systems, z.B. des Abflusses am unteren Gebietsauslass auf einen Eingangsimpuls, z.B. ein Niederschlagsereignis, die Unterteilung des Gesamtsystems in Teileinzugsgebiete vor. Deren Abfluss wird jeweils über einen Auslasspunkt an das unterstromige Teileinzugsgebiet abgegeben. Das Verhalten der Teileinzugsgebiete wird auf eine Reihe verketteter Speicherelemente reduziert. Da Flächen in den Teileinzugsgebieten potentiell unterschiedliche Eigenschaften (Landnutzung, Geologie, Pedologie) aufweisen können, erfolgt eine weitere Unterteilung in Hydrotöpfe. Dies sind Flächen gleicher hydrologischer Eigenschaften in Bezug auf die vertikalen Abflussprozesse. In jedem Hydrotopf werden die Bodenschichten wiederum als eine Kette von Speichern angesehen und für jede Schicht die eindimensionale Kontinuitätsgleichung gelöst.

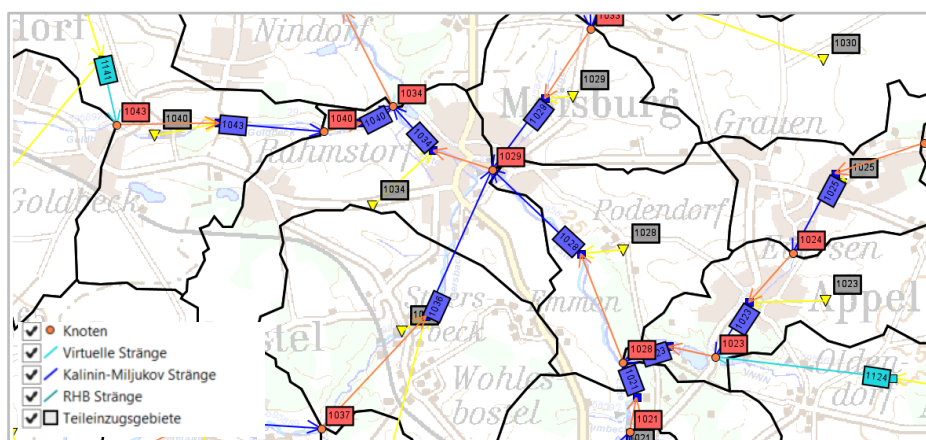
Durch diese Art der Betrachtung ist die räumliche Darstellung der Transportprozesse auf die zeitliche Verzögerung des Abflusses innerhalb der Speicherelemente und die Verkettung der einzelnen Speicherelemente untereinander beschränkt (Pasche 2004). Die Betrachtung der vertikal ablaufenden Prozesse (Abflussbildung) und der lateral ablaufenden Prozesse (Abflusskonzentration) erfolgt getrennt. Bei der Abflussbildung wird der Effektivniederschlag in die einzelnen Abflusskomponenten (Evapotranspiration, Schneeretention, Interzeption, Infiltration und Perkolation) aufgeteilt und steht dort als abflusswirksame Menge zur Verfügung. Die Berechnung erfolgt auf Hydrotopf-Ebene. Bei der Abflusskonzentration (versiegelter Abfluss, Oberflächenabfluss, Interflow, Basisabfluss, Grundwasserabfluss) wird das abflusswirksame

Wasser auf Gebietsebene konzentriert und dem Entwässerungspunkt des zugehörigen Teilgebietes zugeführt. Die Verformung der Abflussganglinien im Gewässer durch Translation und Retention wird durch Flood Routing nach dem Verfahren von KALININ-MILJUKOV berücksichtigt. Für eine detaillierte Darstellung der mathematischen Gleichungen zur Beschreibung der physikalischen Prozesse sei an dieser Stelle auf (Hellmers et al. 2016) verwiesen.

Eine wesentliche Weiterentwicklung von KalypsoHydrology ist die Funktionalität von Overlays durch (Hellmers et al. 2015). Overlays sind Datensätze, die zusätzliche Informationen enthalten und bei der Erzeugung der Hydrotope berücksichtigt werden. Hellmers nutzt den allgemeinen Ansatz der Overlays für die Modellierung von dezentralen Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung (Hellmers et al. 2015).

### 2.3.1.2 Modellaufbau

Die Abgrenzung des oberirdischen Einzugsgebietes und die Unterteilung in Teileinzugsgebiete erfolgt auf der Grundlage des oberirdischen Gewässernetzes und der Geländehöhen. In urbanen Bereichen wird zudem das vorhandene Kanalisationsnetz einbezogen. Die Abgrenzung des unterirdischen Einzugsgebietes erfolgt mit Hilfe von Grundwassergleichenplänen. Die Einzugsgebiete werden mit der Landnutzung inklusive zugeordnetem Versiegelungsgrad, den oberen Bodenschichten, dem hydrogeologischen Profiltyp und weiteren Overlays, wie z.B. den dezentralen Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung, zu Hydrotopen verschnitten. Anschließend wird jedes Hydrotop einem Teilgebiet zugeordnet. Durch diese Zuordnung wird u.a. für jedes Teilgebiet der exakte Versiegelungsgrad bestimmt. Die Teileinzugsgebiete werden hinsichtlich des Oberflächenabflusses, des Abflusses aus der Kanalisation und des Interflow durch Gerinnestränge miteinander vernetzt. Die Gerinnestränge entsprechen den Gewässerabschnitten, in welche die einzelnen Teileinzugsgebiete entwässern. Jedes Teilgebiet hat einen Entwässerungspunkt, der sich am unteren Ende des dazugehörigen Gewässerabschnittes befindet. Dort findet die gesamte Entwässerung des Teilgebietes statt, deren zeitlicher Verlauf auf der Zeitflächenfunktion basiert. Die Gerinnestränge beinhalten Translations- und Retentionsparameter, die eine Verformung der Abflussschwelle bewirken. Die Parameter werden nach dem Verfahren von KALININ-MILJUKOV ermittelt. Die Vernetzung der Teilgebiete ist in Abbildung 5 beispielhaft für den Bereich Moissburg dargestellt.



**Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Vernetzung der Teileinzugsgebiete der Este im Bereich Moissburg**

### 2.3.1.3 Kalibrierung und Validierung

Im Rahmen der Kalibrierung der N-A-Modelle werden Gebiets- und Hydrotoppparameter in einem physikalisch sinnvollen Rahmen variiert mit dem Ziel einer bestmöglichen Anpassung der simulierten an die gemessenen Abflussganglinien. Die Kalibrierung erfolgt für unterschiedlich lange Simulationszeiträume. Für einen langen Simulationszeitraum von einigen Jahren werden zunächst die Parameter angepasst, die die langsamen Abflussprozesse im Untergrund beeinflussen. Konkret handelt es sich um die Retentionskonstanten des Basisabflusses, des Grundwasserabflusses, des Abflusses von natürlichen und von versiegelten Flächen und des Bodenzwischenabflusses. Außerdem sind die Infiltrationskapazität und die Perkulationskapazität von Bodenschichten, die maximale Perkulationsrate, die Porosität des Grundwasserleiters sowie das Porenvolumen der Bodenschichten zu kalibrieren. Im Anschluss werden für mehrere kurze Simulationszeiträume von wenigen Wochen die Parameter angepasst, die die schnelleren Abflussprozesse beeinflussen. Diese finden an der Oberfläche und in der oberen Bodenzone statt. Konkret handelt es sich bei den zu kalibrierenden Parametern um die Retentionskonstanten des Interflow und des Oberflächenabflusses, die Infiltrations- und Perkulationskapazität von Bodenschichten und die Anfangsbodenfeuchte.

Bei der Beurteilung der Approximationsgüte der simulierten Ganglinien an gemessene Ganglinien werden bei Hochwasserereignissen im Wesentlichen die Höhen und die Eintrittszeitpunkte der Hochwasserscheitel, die Steigung des ansteigenden und abfallenden Astes sowie die Füllen der Hochwasserganglinien als Kriterien herangezogen. Bei Niedrig- und Mittelwasserabflüssen reduzieren sich die Kriterien auf die Höhe des Abflusses. Neben dem Vergleich mit gemessenen Zeitreihen wird die Plausibilität der Aufteilung des Abflusses in die Anteile Grundwasserabfluss, Basisabfluss, Interflow und Oberflächenabfluss geprüft. Abbildung 6 zeigt beispielhaft eine Gegenüberstellung der simulierten mit der gemessenen Abflussganglinie am Pegel Emmen (Este) für das Sommerhochwasserereignis im Juli 2002. Der ansteigende und der abfallende Ast, der Scheitel und die Fülle der Kurve werden sehr gut abgebildet. Der Eintrittszeitpunkt des Scheitels tritt bei der Simulation leicht verzögert ein. Die kleineren Abflüsse im Bereich zwischen zwei und sechs Kubikmetern pro Sekunde werden insbesondere nach dem Ablaufen der Hochwasserwelle leicht überschätzt. Insgesamt wird die Abflussganglinie vom Modell gut wiedergegeben. Die Höhe der Approximationsgüte bestätigt sich im Rahmen der Validierung.

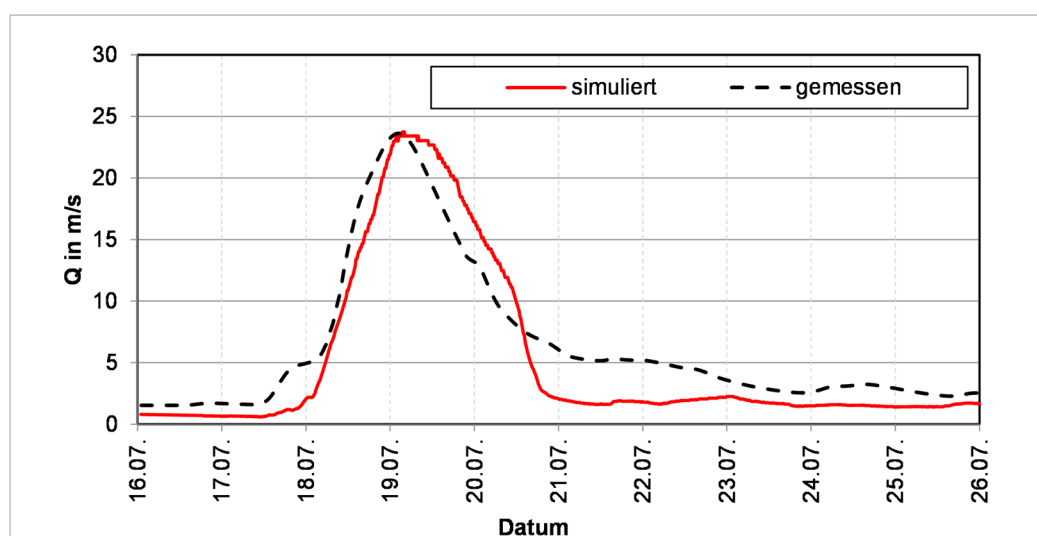


Abbildung 6: Gemessener und simulierter Abfluss am Pegel Emmen (Hochwasser Juli 2002)

Abbildung 7 zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen und der simulierten Abflüsse am Pegel Emmen als Dauerlinien. Die niedrigen Abflüsse kleiner als zwei Kubikmeter pro Sekunde, die rund 90% des Abflussspektrums ausmachen, werden sehr gut vom Modell wiedergegeben. Die Abflüsse zwischen zwei und sechs Kubikmeter pro Sekunde werden vom Modell leicht überschätzt. Die höheren Abflüsse werden hingegen gut abgebildet. Insgesamt wird das Abflussspektrum am Pegel Emmen gut wiedergegeben.

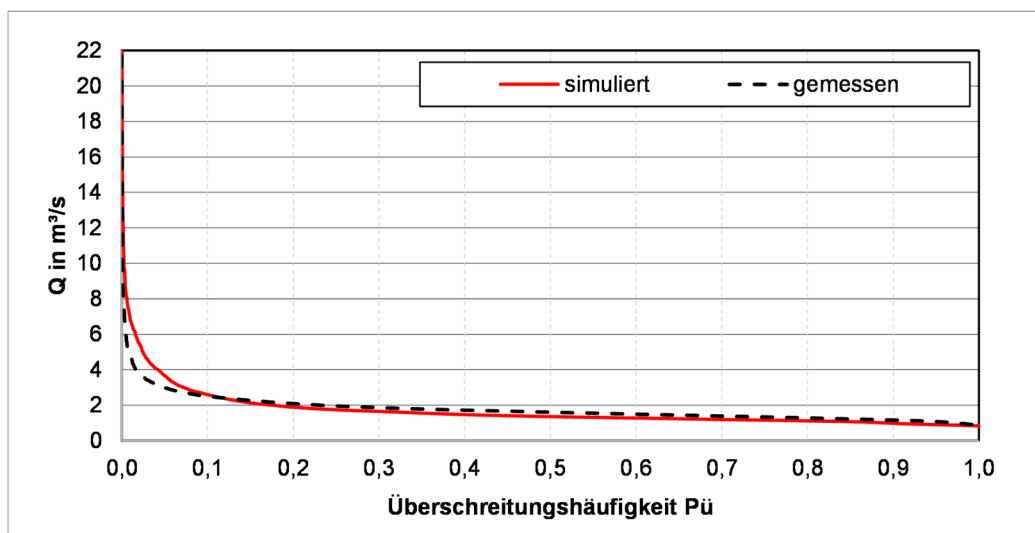


Abbildung 7: Dauerlinien des gemessenen und simulierten Abflusses am Pegel Emmen (1995 – 2014)

### 2.3.2 Hydrodynamische /Morphodynamische Modellierung

Zur Beantwortung der definierten Fragestellungen werden hydrodynamische und morphodynamische Größen (Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten, Schwebstoffkonzentrationen und Sohlentwicklung) im Gewässer auf der Grundlage von hydrodynamisch- numerischen Modellen berechnet. Ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl der Modellierungsmethode ist die vorherrschende Strömungscharakteristik. Diese zeichnet sich an den ausgewählten Flussabschnitten bei mittleren Wasserstands- und Abflussverhältnissen aus durch i) regelmäßiges Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen und Entwässerungsgräben, ii) seitliche Abzweigungen von Prielen, die sich weiter verzweigen und iii) lokale Aufweitungen wie Hafenbecken, Einleitbereiche von Sielen und Schöpfwerken. Im Hochwasserfall kommen außerdem iv) die Überflutung der Vorländer und v) die Schwall- und Sunk-Effekte, die aus Sperrwerksschließungen resultieren, hinzu. Der Salzgehalt des Wassers spielt bei den betrachteten Flüssen aufgrund der Lage ihrer Mündung stromauf von Elbe km 670 keine wesentliche Rolle (vgl. Abschnitt 3.3.3). Dichteinduzierte Effekte auf die Strömung spielen in den ausgewählten Nebenflüssen demzufolge eine untergeordnete Rolle.

Die dreidimensionale Simulation von Strömungen in Gewässern ist bei einem hohen Detaillierungsgrad sehr rechen- und zeitaufwändig. Die im Rahmen dieser Arbeit definierten Fragestellungen erfordern viele Rechenläufe, die selbst unter Einsatz von Hochleistungsrechnern nur durch eine dimensionsreduzierte Betrachtung in akzeptabler Zeit durchzuführen sind. Die für die betrachteten Nebenflüsse beschriebene Strömungscharakteristik zeigt eine Dominanz horizontaler Strömungsprozesse, weshalb die Verwendung eines tiefengemittelten Ansatzes naheliegt. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl der Modellierungsmethode ist die Schwebstoff-

und Sedimentcharakteristik. Diese zeichnet sich an den ausgewählten Flussabschnitten aus durch i) Schwebstoffe mit kohäsiven Eigenschaften, ii) starke Schwankungen der ein- und ausströmenden Schwebstoffkonzentration, die allerdings in der Regel kleiner ist als ein Gramm pro Liter, iii) überwiegend Sedimente mit kohäsiven Eigenschaften und iv) über die Tiefe variierende Sedimenteigenschaften (stationäre Suspension, (teil-)konsolidierte Schichten). Eine stationäre Suspension in Sohlhöhe entsteht insbesondere während der langen Stauwasserzeiten während einer andauernden Sperrwerksschließung. Da der Salzgehalt an den ausgewählten Flussabschnitten in der Regel gering ist ( $< 2$  ppm), spielen salzgehaltsinduzierte Flockungsprozesse eine untergeordnete Rolle. Entsprechend der beschriebenen Charakteristiken ist ein geeigneter Ansatz zu wählen, der analog zu den Strömungsgrößen auf tiefengemittelten Größen basiert.

Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit angewendeten mathematischen Grundgleichungen zur Beschreibung der Hydro- und Morphodynamik zusammenfassend beschrieben.

### 2.3.2.1 Mathematische Beschreibung der Hydrodynamik und der Morphodynamik

Das Strömungsfeld eines strömenden Mediums wird durch die NAVIER-STOKES-Gleichungen beschrieben. Diese werden im Hinblick auf die praktische Anwendbarkeit einer zeitlichen Mittelung unterzogen. Dabei wird der turbulente Fließgeschwindigkeitsanteil aus den Gleichungen eliminiert. Die resultierenden REYNOLDS-Gleichungen beschreiben nun das mittlere Strömungsfeld durch zeitlich gemittelte Größen. Bei der Mittelung entsteht ein neuer Term, der die Schubspannungen (REYNOLDS-Spannungen) infolge Turbulenz enthält. Da diese zunächst unbekannt sind, erhöht sich der Freiheitsgrad des Systems. Mittels einer Schließannahme werden die Größen der REYNOLDS-Spannungen auf die mittleren Größen zurückgeführt. Hierzu wird zumeist das Wirbelviskositätsprinzip von BOUSSINESQ herangezogen. Dieses basiert auf der Verknüpfung der REYNOLDS-Spannungen mit dem Gradienten der mittleren Geschwindigkeiten über die Wirbelviskosität. Auf diesem Prinzip basiert eine Vielzahl von Turbulenzmodellen, die jedes für sich einen formelmäßigen Zusammenhang zwischen der Wirbelviskosität und der mittleren Strömung in Form von keiner, einer oder zwei partiellen Differentialgleichungen (Null-, Ein- und Zweigleichungsmodelle) liefern.

Die REYNOLDS-gemittelten Flachwassergleichungen ergeben sich aus den dreidimensionalen REYNOLDS-Gleichungen, indem die vertikale Impulsgleichung durch den hydrostatischen Druckansatz ersetzt wird. Die Tiefenintegration macht zwei weitere Schließannahmen erforderlich. Die erste Annahme wird erforderlich, da die Reibung des Wassers an der Gewässersohle Schubspannungen  $\tau_{s0}$  hervorrufen, die zunächst unbekannt sind. Zur Bestimmung dieser Größen werden in der Regel Fließgesetze herangezogen. Ein heute weit verbreitetes Fließgesetz ist die Formulierung nach DARCY-WEISBACH

$$u = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_E} \quad (2-2)$$

Der Fließwiderstand der Sohle ergibt sich nach COLEBROOK-WHITE zu

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,03 \cdot \log \left( \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{14,84 \cdot r_{hy}} \right) \quad (2-3)$$

Die Schubspannung  $\tau_{s0}$  ergibt sich aus dem NEWTON-TAYLOR-Gesetz zu

$$\tau_{s0} = \rho \cdot \frac{\lambda}{8} \cdot u \cdot |u|. \quad (2-4)$$

Die zweite Annahme wird erforderlich, da aus der Ungleichförmigkeit des Geschwindigkeitsprofils ein Impulsaustausch resultiert. Dieser wird als Dispersion bezeichnet. Das vertikale Geschwindigkeitsprofil ist zumeist unbekannt und variiert zudem sehr stark über die Zeit, z.B. bei tideinduzierten Strömungen, und über die Lage, z.B. in Flusskrümmungen. Eine korrekte Schätzung eines Geschwindigkeitsprofils ist in diesem Fall unmöglich. Prinzipiell unterscheidet sich der Term der dispersiven Schubspannungen allerdings nur geringfügig von den REYNOLDS-Spannungen. Daher ist es ein praktikabler Ansatz, die dispersiven Schubspannungen implizit über die Wirbelviskosität abzubilden.

Eine detaillierte Herleitung der REYNOLDS-gemittelten Flachwassergleichungen ist u.a. in (Kuipers und Vreugdenhil 1973) oder (Schlichting et al. 2006) zu finden. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Gleichungen in folgender nicht-konservativer Form gelöst:

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = q \quad (2-5)$$

Bewegungsgleichung in x-Richtung:

$$\begin{aligned} & \underbrace{h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y}}_{\text{instationäre und advective Beschleunigung}} \\ &= \underbrace{-gh \frac{\partial}{\partial x} (z_0 + h)}_{\text{hydrostat. Druck}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial (h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial y}}_{\text{viskose und turbulente Schubsp.}} + \underbrace{\frac{\tau_{w,x} - \tau_{b,x}}{\rho}}_{\text{Wind und Sohl Schubsp.}} \\ &+ \underbrace{h \frac{F_{c,x}}{\rho}}_{\text{Coriolisbeschl.}} - \underbrace{\frac{u_s q_s}{\rho}}_{\text{Quellterm}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^{z_0+h} \rho \hat{u} \hat{u} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^{z_0+h} \rho \hat{u} \hat{v} dz}_{\text{dispersive Schubsp.}} \end{aligned} \quad (2-6)$$

Bewegungsgleichung in y-Richtung:

$$\begin{aligned} & \underbrace{h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y}}_{\text{instationäre und advective Beschleunigung}} \\ &= \underbrace{-gh \frac{\partial}{\partial y} (z_0 + h)}_{\text{hydrostat. Druck}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (h\tau_{yy})}{\partial y}}_{\text{viskose und turbulente Schubsp.}} + \underbrace{\frac{\tau_{w,y} - \tau_{b,y}}{\rho}}_{\text{Wind und Sohl Schubsp.}} \\ &+ \underbrace{h \frac{F_{c,y}}{\rho}}_{\text{Coriolisbeschl.}} - \underbrace{\frac{v_s q_s}{\rho}}_{\text{Quellterm}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^{z_0+h} \rho \hat{u} \hat{v} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^{z_0+h} \rho \hat{v} \hat{v} dz}_{\text{dispersive Schubsp.}} \end{aligned} \quad (2-7)$$

Der Schwebstofftransport wird im wesentlichen von der Advektion, der Diffusion und dem Absinken der Schwebstoffe dominiert. Diese Prozesse werden durch die dreidimensionale Schwebstofftransportgleichung mathematisch beschrieben. Die Lösung der Gleichung setzt allerdings die Kenntnis des Strömungsfeldes voraus. Im Hinblick auf die praktische

Anwendbarkeit erfolgt eine zeitliche Mittelung analog zum Vorgehen bei den NAVIER-STOKES Gleichungen. Im Ergebnis entsteht ebenfalls ein zusätzlicher Term, der den turbulenten Massenfluss von Schwebstoffen beschreibt und zunächst unbekannt ist. Daher wird auch hier eine Schließungsannahme erforderlich in Form der turbulenten Diffusionskoeffizienten in transversaler und vertikaler Richtung. Ein klassischer Ansatz zur Ermittlung der Diffusionskoeffizienten ist die Annahme einer Proportionalität der Diffusionskoeffizienten zur Schergeschwindigkeit und zur Wassertiefe (Fischer 1979). Der turbulente Diffusionskoeffizient normal zur Fließrichtung ist bei gleichförmiger Strömung gleich dem transversalen Diffusionskoeffizienten.

Außerdem wird die Schwebstofftransportgleichung analog zur REYNOLDS-Gleichung über die Tiefe integriert, woraus sich die tiefengemittelte Schwebstofftransportgleichung (Advektions-Diffusionsgleichung) ergibt. Auch hier resultiert aus der Ungleichförmigkeit des Geschwindigkeitsprofils eine dispersive Konzentrationsausbreitung, die eine Schließungsannahme in Form eines longitudinalen Dispersionskoeffizienten erforderlich macht. Wiederum in Analogie zu der Hydrodynamik ist es ein praktikabler Ansatz, die Wirkung der Dispersion implizit über die turbulenten Diffusionskoeffizienten abzubilden.

Zur Lösung der Gleichung sind Annahmen an der Wasseroberfläche und der Sohle zu treffen. An der Wasseroberfläche wird angenommen, dass kein Massenfluss senkrecht zu ihr erfolgt. An der Sohle wird angenommen, dass Sediment abgelagert oder erodiert werden kann, woraus sich ein Senken- und ein Quellterm in der Gleichung ergibt. Für die komplette Herleitung der tiefengemittelten Schwebstofftransportgleichung sei an dieser Stelle auf (Ariathurai et al. 1977), (Socolofsky und Jirka 2002) und (Malcherek 2007) verwiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die tiefengemittelte Schwebstofftransportgleichung in folgender nicht-konservativer Form gelöst:

$$\underbrace{h \frac{\partial C}{\partial t} + uh \frac{\partial C}{\partial x} + vh \frac{\partial C}{\partial y}}_{\text{advektiver Transport}} - \underbrace{hD_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - hD_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}}_{\text{diffusive/dispersive Ausbreitung}} - \underbrace{S_{\text{dep}}}_{\substack{\text{Senke} \\ \text{Depositions-} \\ \text{rate}}} + \underbrace{S_{\text{ero}}}_{\substack{\text{Quelle} \\ \text{Erosions-} \\ \text{rate}}} = 0 \quad (2-8)$$

### Depositionsrate

Die klassische Formulierung der Depositionsrate für kohäsive Sedimente lautet nach (Krone 1962) und (Partheniades 1965):

$$S_{\text{dep}} = \begin{cases} w_s \cdot C \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{c,\text{dep}}}\right), & \text{für } \tau_0 < \tau_{c,\text{dep}} \\ 0, & \text{für } \tau_0 \geq \tau_{c,\text{dep}} \end{cases} \quad (2-9)$$

### Sinkgeschwindigkeit

Da die Schwebstoffe in der Unterelbe und den tidebeeinflussten Nebenflüssen überwiegend aus Flocken bestehen, die im Allgemeinen eine unregelmäßige Oberfläche aufweisen, ist eine Berechnung der Sinkgeschwindigkeit nach Stokes nicht korrekt. Sinnvollere Werte können durch in-situ Messungen ermittelt werden. Nach (Rijn, Leo C. van 1993) treten ab Konzentrationen größer als 1 g/l zusätzliche Prozesse wie behindertes Absinken (Richardson und Zaki 1954) auf. Da die Konzentrationen in der Unterelbe in der Regel unterhalb dieses Grenzwertes liegen, wird

dieser Effekt in guter Näherung vernachlässigt. Flockungsprozesse und das Auseinanderbrechen der Flocken werden in Anbetracht der Zielsetzung ebenfalls vernachlässigt.

### Erosionsrate

Bei Überschreitung der jeweiligen kritischen Erosionsschubspannung beginnt die Erosion von Material aus der Schicht der stationären Suspension, der teilkonsolidierten Schicht und der konsolidierten Schicht (vgl. Abschnitt 3.3.3). Bei Unterschreitung der jeweiligen kritischen Erosionsschubspannung sind die Schichten erosionsstabil. Die klassische Formulierung der Erosionsrate für kohäsive Sedimente lautet nach (Partheniades 1965):

$$s_{ero} = \begin{cases} \beta_{ero} \left( \frac{\tau_0}{\tau_{c,ero}} - 1 \right), & \text{für } \tau_0 > \tau_{c,ero} \\ 0, & \text{für } \tau_0 \leq \tau_{c,ero} \end{cases} \quad (2-10)$$

### 2.3.2.2 Modellverfahren RMA Kalypso

Zur Lösung der beschriebenen Gleichungen wird im Rahmen dieser Arbeit das zweidimensionale, hydrodynamisch-numerische Modellverfahren RMA Kalypso eingesetzt. Dieses wird zur Simulation stationärer und instationärer Freispiegelströmungen im Flachwasserbereich sowie zur Simulation des Transports kohäsiver oder nicht-kohäsiver Sedimente eingesetzt.

RMA Kalypso ist ein Derivat des Modellverfahrens RMA 10S, welches von (King 2006) entwickelt wurde. Gegenüber dem ursprünglichen Modellverfahren verfügt RMA Kalypso über Erweiterungen, wie z.B. das Fließgesetz von Darcy-Weisbach unter Verwendung des Fließwiderstandes nach COOLEBROOK-WHITE für die Sohlrauheit ( $k_s$ -Wert) und des Fließwiderstandes für durchströmten Bewuchs nach LINDNER/PASCHE (Lindner 1982), (Pasche 1984). Darüber hinaus sind in RMA Kalypso ein detaillierter polynombasierter eindimensionaler FE-Ansatz nach (Teschke 2004) sowie eine erweiterte Kopplungsmöglichkeit von 1D und 2D Approximationsmodellen nach (Schrage und Pasche 2009) implementiert.

Die hydrodynamischen Größen werden durch Lösen der zeitgemittelten Flachwassergleichungen bestimmt. Die Gleichungen werden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode auf einem Gitternetz gelöst, das das Lösungsgebiet approximiert. Ein Vorteil der verwendeten Methode ist die große Flexibilität bei der Diskretisierung des Lösungsgebietes. Das Rechengitter kann strukturiert oder unstrukturiert sein und aus Dreiecken und/oder Vierecken bestehen. Durch den Einsatz unterschiedlicher Elementtypen können die typischerweise vorkommenden morphologischen Strukturen, wie z.B. Verzweigungen, lokale Aufweitungen, und steile Böschungen im Bereich der Ufer optimal abgebildet werden. Insgesamt kann auf diese Weise mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Elementen ein hoher Detaillierungsgrad erzielt werden.

Die Lösung der hydrodynamischen Gleichungen und der Sedimenttransportgleichungen erfolgt mit Hilfe des NEWTON-RAPHSON-Verfahrens. Die Formulierung der zeitlichen Ableitungen erfolgt ein modifiziertes CRANK-NICHOLSON-Verfahren. Zur Modellierung des Einflusses der Turbulenz stehen in RMA Kalypso unterschiedliche Wirbelviskositätsmodelle zur Verfügung, wie z.B. ein sohlinduzierter Ansatz oder ein Ansatz auf Basis der PRANDTL'schen Mischweglänge nach SMAGORINSKY. Beide Ansätze können auch in Kombination verwendet werden. Eine

detaillierte Analyse der unterschiedlichen Turbulenzmodelle ist in (Lippert 2005) zu finden, der die Anwendung auf naturnahe Fließgewässer untersucht.

Der von (King und Roig 1988) entwickelte und implementierte Ansatz zur Prozessbeschreibung beim Trockenfallen und Wiederbenetzen von Flächen, ermöglicht detaillierte Untersuchungen im Bereich von Wattflächen.

Der Schwebstofftransport und morphodynamische Änderungen werden durch die Lösung der tiefengemittelten Transportgleichung für Schwebstoffe (Advektions-Diffusions-Gleichung) und einer reduzierten Form der Sohlevolutionsgleichung (EXNER-Gleichung ohne Geschiebetransport) berechnet. Zur Lösung der Schwebstofftransportgleichung wird dasselbe Verfahren wie zur Lösung der hydrodynamischen Gleichungen verwendet. Dabei kann die Lösung aller Gleichungen entweder parallel in einem Gleichungssystem oder, wie im Rahmen dieser Arbeit, in jedem Zeitschritt sequenziell in der Abfolge Hydrodynamik – Morphodynamik gelöst werden.

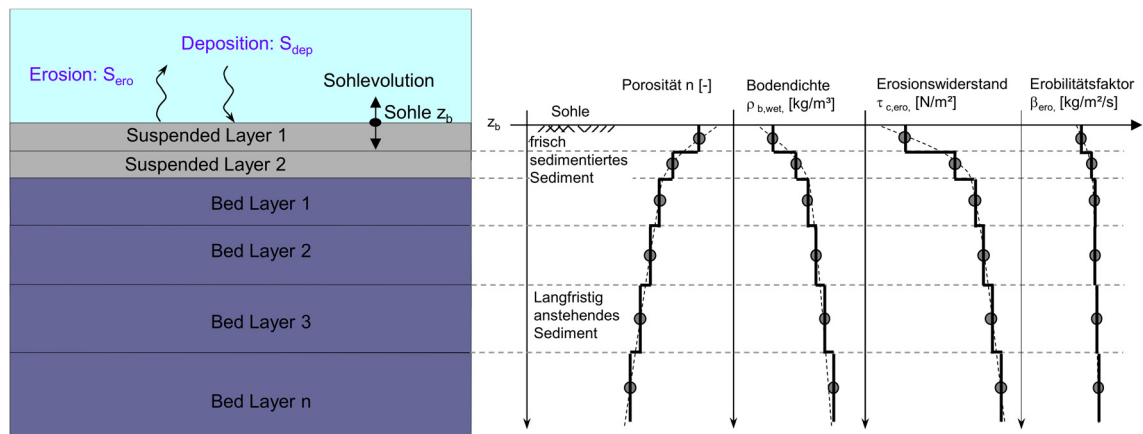
RMA Kalypso beinhaltet u.a. einen Ansatz zur Berechnung des Transports kohäsiver Sedimente inklusive der spezifischen Erosions- und Depositionsprozesse. Die Berechnung der Erosionsrate kann u.a. nach dem Ansatz von PARTHENIADES, vorgeschlagen von (Ariathurai 1974) auf der Grundlage von Daten aus (Partheniades 1965) erfolgen. Die Berechnung der Depositionsrate erfolgt in Anlehnung an (Krone 1962) und (Partheniades 1965), gewichtet über den Schubspannungsanteil. Zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit  $w_s$  steht eine erweiterte empirische Formulierung zur Verfügung (King 2006). Die Beschreibung der Sinkgeschwindigkeit  $w_s$  erfolgt anlehnend an die Formulierung nach (Overbeek 1952) und (Krone 1962):

$$w_s = k \cdot C^m \quad (2-11)$$

Diese Formulierung wurde von (King 2006) erweitert:

$$w_s = \begin{cases} w_{s1} & , \text{für } C < C_1 \\ w_{s1} \left( \frac{C}{C_1} \right)^{\exp 2} & , \text{für } C_1 \leq C \leq C_2 \\ w_{s2} = w_{s1} \left( \frac{C_2}{C_1} \right)^n & , \text{für } C > C_2 \end{cases} \quad (2-12)$$

Ein Multi-Layer-Bodenmodell ermöglicht die differenzierte Berücksichtigung der Sedimente über die Tiefe in Form von veränderlichen Sedimenteigenschaften und veränderlichen vertikalen Austauschprozessen (Donner 2014). Das Modell basiert auf zwei unterschiedlichen Layer-Typen mit denen die unterschiedlichen Eigenschaften der Bodenschichten (stationäre Suspension und (teil-)konsolidierte Schichten) abgebildet werden können. Der oberste Layer des Bodenmodells wird als *suspended layer* bezeichnet. Dieser bildet die Eigenschaften von weichem, frisch sedimentiertem Material (stationäre Suspension) ab. Darunter folgen *bed layer*, die die Eigenschaften der tieferliegenden (teil-)konsolidierten Schichten abbilden. Durch eine Abfolge von Schichten geringer Dicke (*bed layer*), können über die Tiefe nicht linear verlaufende Eigenschaften abgebildet werden (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Bodenlayermodell für kohäsive Sedimente in tidebeeinflussten Flüssen mit Entwicklung der charakteristischen Größen bzw. Parameter über die Tiefe (aus Donner 2014)**

Ein Faktor, der auch als morphologischer Faktor bezeichnet wird, ermöglicht eine beschleunigte Berechnung der Bodenevolution.

### 2.3.2.3 Modellaufbau

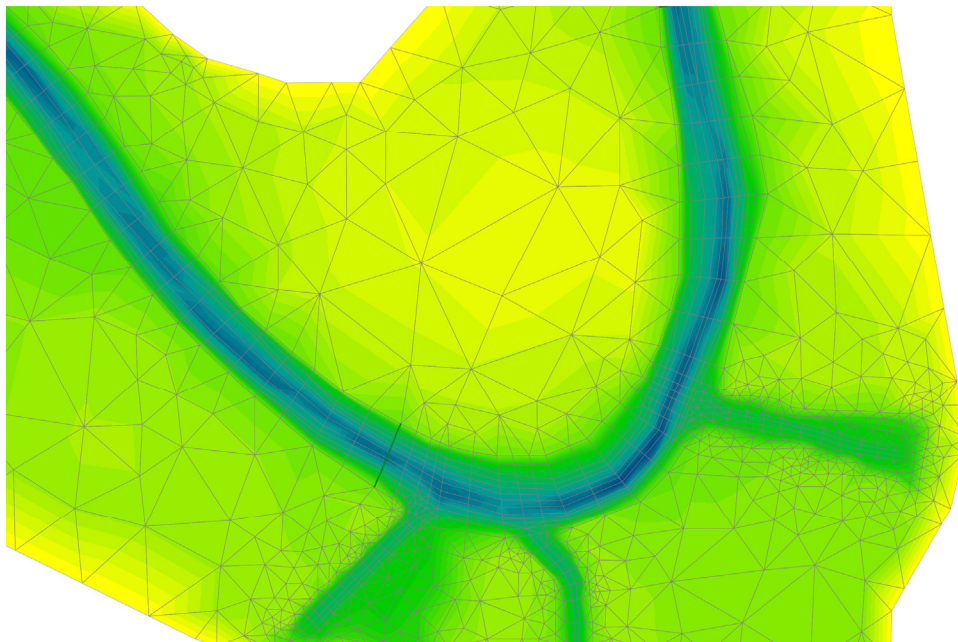
Für die beiden Nebenflüsse Este und Krückau wurde jeweils ein zweidimensionales gekoppeltes hydrodynamisch-morphodynamisches Modell aufgestellt. Modellaufbau und Auswertung erfolgten unter Verwendung des Moduls Kalypso1D/2D des wasserwirtschaftlichen Open-Source-Modellierungssystems Kalypso (Lippert et al. 2009), (Belger et al. 2009).

Die Finite-Elemente-Gitter bestehen aus planaren Dreiecken und Vierecken. Zur detaillierten Abbildung der morphologischen Gegebenheiten wurden bei der Gittererstellung u.a. die Topographie der Gewässersohle und des Vorlandes, sowie Uferlinien, Deichlinien, sonstige markante Bruchkanten, Grabenverläufe und Bauwerksumringe einbezogen. Je nach Komplexität der morphologischen Gegebenheiten variieren die Kantenlängen zwischen etwa 0,25 m und 50 m. Die Flächen der Elemente variieren zwischen 0,05 m<sup>2</sup> und 1250 m<sup>2</sup>. Vor allem im Bereich des Gewässers ist die Auflösung besonders hoch, um kleinskalige Gewässerstrukturen und steile Böschungen, die in den tidebeeinflussten Abschnitten vorkommen, detailliert abzubilden. Die Gitterauflösung im Bereich des Vorlandes ist aufgrund der flachen Topographie und zu erwartender geringer Geschwindigkeitsschwankungen deutlich geringer. Eine Ausnahme bilden die Entwässerungsgräben im Bereich des Vorlandes. Gräben mit einer bordvollen Breite bis rund fünf Metern sind im Gitternetz mit mindestens vier Knoten, d.h. mit drei Elementreihen, im Querprofil erfasst.

Durch die hohe Güte der Approximation ist sichergestellt, dass Prozesse wie lokale Richtungsänderungen und steile horizontale Geschwindigkeitsgradienten (treten u.a. im Böschungsbereich auf) korrekt abgebildet werden.

Die Informationen zur Topographie des Geländes stammen aus den digitalen Geländemodellen (DGM) der Länder. Die Topographie des Flussbettes im Oberlauf stammt aus Querprofilmessungen, die vor einigen Jahren im Auftrag der Länder erfolgten. Im Bereich der schiffbaren Unterläufe stammen die Höheninformationen aus den im Rahmen dieser Arbeit

durchgeführten Fächerlotmessungen (2.2.2). Abbildung 9 zeigt beispielhaft das erzeugte Finite-Elemente-Gitter für einen Abschnitt der Este.



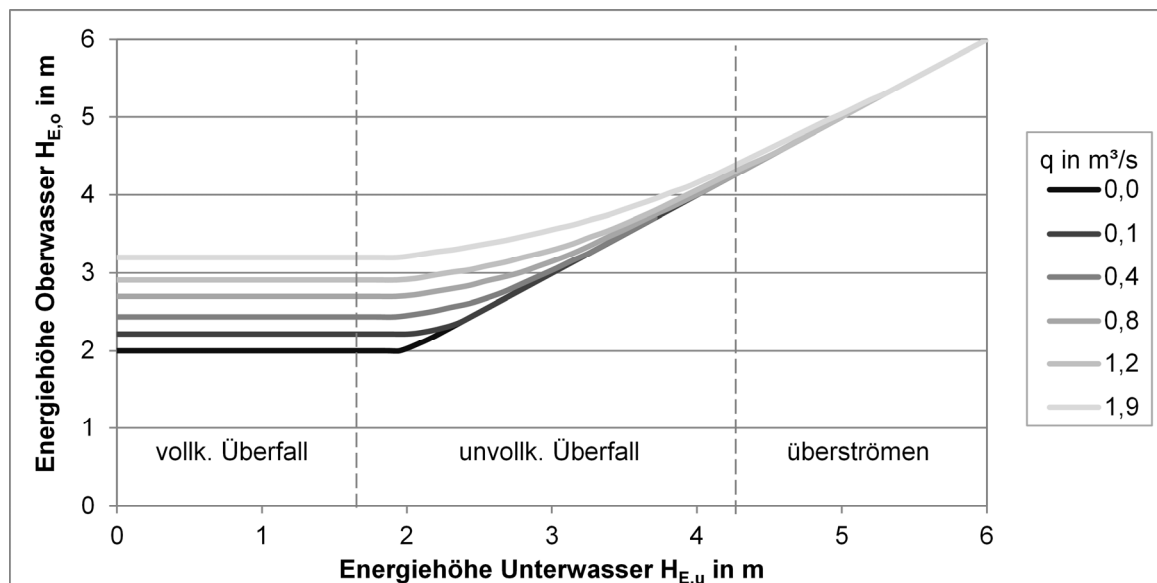
**Abbildung 9: Finite-Elemente-Gitter eines Gewässerabschnittes der Este**

In den betrachteten Nebenflüssen kommen vier hydraulisch relevante Bauwerkstypen vor, die in die jeweiligen Modelle integriert sind. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Bauwerkstypen und die flusspezifischen Bauwerksbezeichnungen.

**Tabelle 2: Modellierte Bauwerke in Este und Krückau**

Fluss	Wehre	Brücken	Schöpfwerke	Sperrwerke
Este	Marschtorzwinger	Hafenbrücke K39, Estebrügge, Hove	Rübke, Neuland, Estebrügge, Leeswig, Hove, Nincop, Vogelsang, Liedenkummer	Inneres Este- sperrwerk, Äußeres Este- Sperrwerk
Krückau	Pieningsche Mühle	Hafenbrücke B431	Seestermühle, Wisch- Kurzenmoor, Raa, Kaltenweide	Krückau- Sperrwerk

Wehre regulieren den Wasserstand im Oberwasser. Der Wehrüberfall ist je nach Wasserstandsverhältnissen im Ober- und Unterwasser in drei hydraulisch unterschiedlich wirkende Formen zu unterteilen: vollkommen, unvollkommen und überströmt. Es ist eine Besonderheit von Wehren, die die Tidegrenze eines Flusses markieren und deren Wehrkronenhöhe nicht wesentlich über dem Thw liegt (z.B. das Wehr am Marschtorzwinger in Buxtehude), dass durch den tidebedingt schwankenden Unterwasserstand innerhalb eines Tidezyklusses alle drei Formen des Überfalls auftreten können. In den erstellten numerischen Modellen werden die Wehre über ihre individuelle Energiehöhenbeziehung abgebildet, die auf der Grundlage der allgemeinen Wehrüberfallformel (Knapp 1963) ermittelt wurden. Abbildung 10 zeigt beispielhaft die für das Wehr am Marschtorzwinger (Este) ermittelten Energiehöhenbeziehungen für unterschiedliche spezifische Abflüsse.



**Abbildung 10: Energiehöhenbeziehungen für unterschiedliche spezifische Abflüsse am Beispiel des Wehrs am Marschtorzwinger (Este)**

Bei den Brücken, die die Unterläufe queren, ist kein Einstau der Brückenplatte zu erwarten, so dass lediglich die Widerlager und Brückenpfeiler in das Rechengitter integriert wurden. Im Bereich dieser Strukturen ist die Netzauflösung höher, um die auftretenden Strömungsprozesse, wie z.B. die Umströmung und die Ausbildung von Sekundärströmungen, korrekt abzubilden.

Schöpfwerke verursachen durch den seitlichen Impulseintrag eine Ablenkung der Hauptströmungsrichtung und induzieren Sekundärströmungen. Um diese Prozesse korrekt abzubilden, ist der Einlaufbereich in das Rechengitter integriert. Zudem ist das Rechengitter des Flussschlauches im Bereich der Einleitungen lokal verfeinert. Der Zufluss wird über einen seitlichen Modellrand als Randbedingung eingesteuert.

Sperrwerke schnüren den Gewässerquerschnitt lokal ein und verursachen eine lokale Erhöhung der Geschwindigkeit sowie Sekundärströmungen im Bereich der Aufweitung. Um diese Effekte abzubilden sind die Widerlager integriert und die Netzauflösung ist im Nahbereich verfeinert. Analog zu den Wehren wird die hydraulische Wirkung der Sperrwerksöffnung über Energiehöhenbeziehungen abgebildet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zudem eine wasserstandsabhängige Steuerung der Bauwerke in RMA Kalypso implementiert. Dadurch kann das Verhalten der Sperrwerke, die in Realität ab definierten Wasserständen geschlossen werden, realitätsnah abgebildet werden.

### 2.3.2.4 Kalibrierung und Validierung

Bei der Kalibrierung und der Validierung der hydrodynamisch-numerischen Modelle werden real aufgetretene und anhand von Messdaten dokumentierte Ereignisse nachsimuliert. An den Unterläufen der Nebenflüsse stehen für mehrere Standorte gemessene Zeitreihen des Wasserstands und der Fließgeschwindigkeiten zur Verfügung auf deren Grundlage eine Kalibrierung und eine Validierung durchgeführt wurden.

Bei einer Kalibrierung werden die Werte der parametrisierten Größen im Rahmen eines physikalisch sinnvollen Bereiches variiert. Das Ziel der Kalibrierung ist eine bestmögliche Anpassung der simulierten an die gemessenen Strömungsgrößen. Im Rahmen einer Validierung an mindestens einem unabhängigen Ereignis wird die Güte des Modells bestätigt. Zur Berechnung der hydrodynamischen Strömungsgrößen sind in erster Linie der Fließwiderstand der Gewässersohle und des Vorlandes sowie die turbulente Viskosität (Wirbelviskosität) zu parametrisieren. Die Wirkung der Gewässersohle und des Geländes auf das Strömungsfeld wird über das Fließgesetz von DARCY-WEISBACH berechnet. Die hierzu erforderlichen äquivalenten Sandrauheiten ( $k_s$ -Werte) werden im Bereich des Vorlandes aus den ALKIS-Landnutzungsklassen abgeleitet. Die Zuordnung der  $k_s$ -Werte zu den Landnutzungsklassen erfolgt entsprechend der Angaben in der Fachliteratur wie (BWK 1999; LfU 2004). Die  $k_s$ -Werte im Bereich der Böschungen und des Flussschlauches basieren auf Beprobungen des Sohlmaterials und Befahrungen der Gewässer um  $T_{nw}$  (Abschnitt 4.2.1). Eine Übersicht der  $k_s$ -Werte der Rauheitsklassen gibt Tabelle 34 im Anhang. Die Quantifizierung der Wirbelviskosität erfolgt über einen kombinierten Ansatz, der sowohl den Einfluss des vertikalen Impulsaustauschs (sohlinduziert) als auch des horizontalen Impulsaustauschs (PRANDTLsche Mischweglänge nach SMAGORINSKY) berücksichtigt. Das Turbulenzmodell verfügt über empirische Parameter, die im Rahmen der Kalibrierung festgelegt werden.

Für das Modell der Krückkau erfolgte eine Kalibrierung im Rahmen der Arbeit von (Donner 2014). Die ermittelten  $k_s$ -Werte sowie die Parameter für das Turbulenzmodell wurden im Wesentlichen übernommen. Die Kalibrierung des Modells der Este erfolgt im Rahmen dieser Arbeit. Abbildung 11 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen mit den simulierten Ganglinien des Wasserstands und der Fließgeschwindigkeit bei km 2,0. Insgesamt zeigt sich eine sehr gute Anpassung der simulierten Kurven an die gemessenen Kurven. Dies gilt auch für den Zeitraum während der Sperrwerksschließung (02:00 – 05:00 Uhr). Sowohl der Absperrsturz unmittelbar nach der Sperrung als auch die daran anschließende rasche Beruhigung der Strömung werden sehr gut abgebildet. Weitere Gegenüberstellungen für andere Querschnitte bestätigen sowohl für das Kalibrierungs- als auch für das Validierungsereignis ebenfalls eine sehr gute Anpassung des Modells.

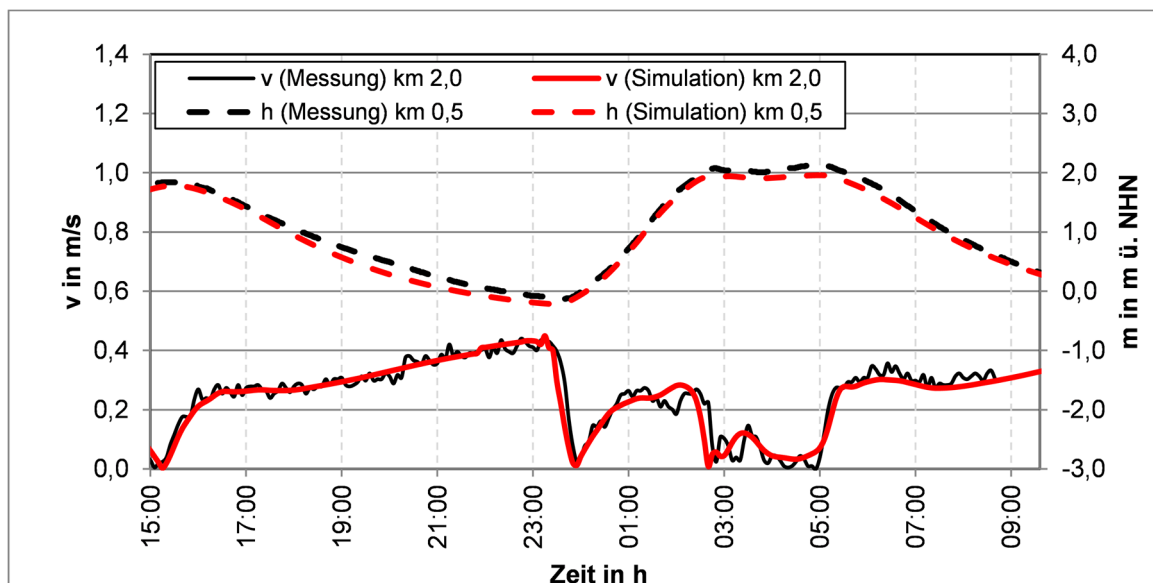


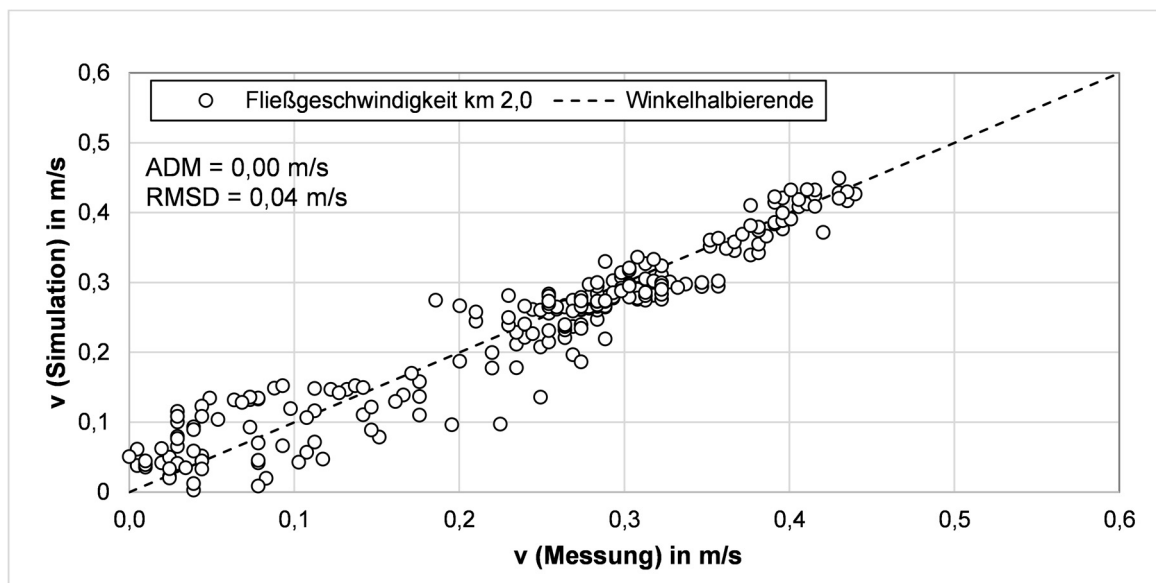
Abbildung 11: Gemessene und simulierte Strömungsgrößen in der Este (04.03.2008 15:00 - 05.03.2008 09:00, km 2,0, Messdaten: WSA Hamburg)

Neben der visuellen Einschätzung wird die Güte der Anpassung zudem über definierte Kriterien bewertet. Für hydrodynamische Modellergebnisse werden häufig die beiden nachfolgenden Kriterien herangezogen.

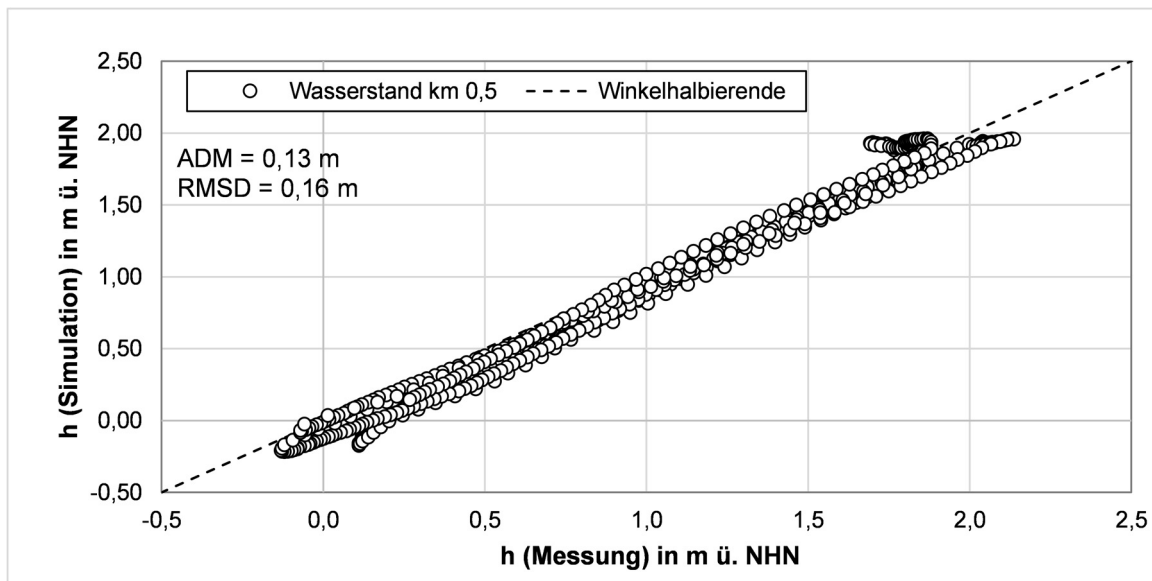
$$\text{Absolute Difference Mean} \quad \text{ADM} = \frac{1}{n} \sum_i^n |(\text{Simulated} - \text{Observed})| \quad (2-13)$$

$$\text{Root Mean Square Difference} \quad \text{RMSQ} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (\text{Simulated} - \text{Observed})^2} \quad (2-14)$$

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen Streudiagramme in denen die simulierten über die gemessenen Werte aufgetragen sind. Sowohl bei den Fließgeschwindigkeiten als auch bei den Wasserständen variieren die Werte innerhalb einer kleinen Bandbreite um die Winkelhalbierende. Die nach den Formeln (2-13) und (2-14) berechneten mittleren Abweichungen sind sehr gering und bestätigen den visuellen Eindruck. Im Vergleich zu dem gesamten Spektrum der jeweiligen Größe (Fließgeschwindigkeit 0,0 – 0,45 m/s, Wasserstand – 0,5 - 2,0 m ü. NHN) sind die berechneten mittleren Abweichungen geringer als zehn Prozent.



**Abbildung 12: Streudiagramm der gemessenen und simulierten Geschwindigkeiten in der Este bei km 2,0 (04.03.2008 15:00 - 05.03.2008 09:00, Messdaten: WSA Hamburg)**



**Abbildung 13: Streudiagramm der gemessenen und simulierten Wasserstände in der Este bei km 0,5 (04.03.2008 15:00 - 05.03.2008 09:00, Messdaten: WSA Hamburg)**

Bei der Berechnung des Transports kohäsiver Sedimente sind u.a. die kritischen Depositionsschubspannungen  $\tau_{c,dep}$ , die Sinkgeschwindigkeiten der Schwebstoffe  $w_s$ , die kritischen Erosionsschubspannungen  $\tau_{c,ero}$  und die Erodibilität  $\beta_{ero}$  zu parametrisieren. Für das Modell der Krückau erfolgte eine Kalibrierung im Rahmen der Arbeit von (Donner 2014). Die Werte für die aufgezählten Parameter wurden für das hier eingesetzte Modell der Krückau im Wesentlichen übernommen. Die Kalibrierung des Modells der Este erfolgt im Rahmen dieser Arbeit. Ein Großteil der notwendigen Informationen zur Kalibrierung des Modells der Este wurden aus den durchgeführten Messungen in der Natur abgeleitet, wie z.B. die mittlere Sinkgeschwindigkeit<sup>7</sup> (Abschnitt 2.2.1). Darüber hinaus wurden Sedimentproben im Bereich der Fahrrinne und der Böschungen entnommen und bodenmechanische Eigenschaften (Korngrößenverteilungen, Glühverlust) im Labor analysiert. Abbildung 14 zeigt einige ausgewählte Korngrößenverteilungen von Sohlsedimenten. Im Bereich der Mündung (km 12,5) liegt in der Fahrrinne ein toniger Schluff vor. Weiter stromauf im Abschnitt zwischen Estebücke (km 5,5) und Moorende (km 4,5) zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Fahrrinne und Böschung. Die Probe aus dem Bereich der Böschung ist ebenfalls ein toniger Schluff, während die Probe aus der Böschung ein Sand mit kiesigen und schluffigen Anteilen ist. Die im Querprofil stark variierende Sedimentzusammensetzung ist typisch für den Este Abschnitt zwischen dem Inneren Este-Sperrwerk und Buxtehude.

<sup>7</sup> Im Fall eines geschlossenen Sperrwerks nehmen die Fließgeschwindigkeiten sehr schnell ab. Die Schwebstoffe beginnen abzusinken. Aus der Änderung des Tiefenprofils der Schwebstoffkonzentration kann eine mittlere Sinkgeschwindigkeit abgeleitet werden.

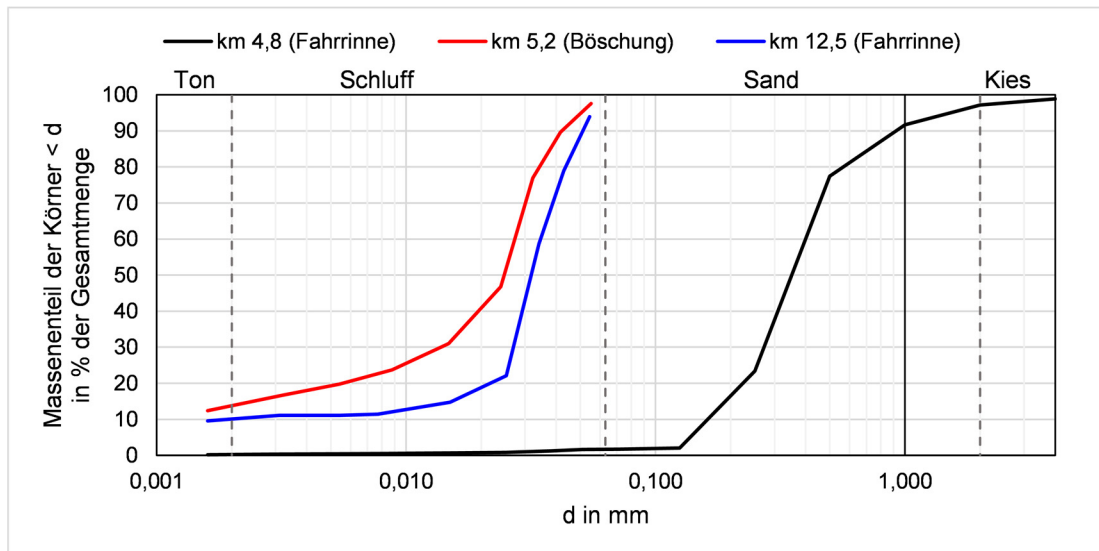


Abbildung 14: Korngrößenverteilungen des Sohlmaterials in der Este an ausgewählten Standorten

Die Werte der zu kalibrierenden Parameter werden soweit möglich auf der Grundlage der gemessenen Daten festgelegt. Für die Erodibilität und die kritische Depositionsschubspannung, werden Werte aus der Literatur herangezogen. Eine Übersicht der verwendeten Werte befindet sich in Tabelle 35 im Anhang. Zur Beurteilung der Güte der Anpassung der simulierten Größen an die gemessenen Größen können grundsätzlich mehrere Größen, wie z.B. Ganglinien der Schwebstoffkonzentration, Massenbilanzen oder Sohlhöhenänderungen herangezogen werden. Praktisch sind die meisten Größen in der Natur allerdings nur mit hohen Unsicherheiten zu erfassen, wodurch die Kalibrierung deutlich erschwert wird. Für die Este liegt eine gemessene Zeitreihe der Schwebstoffkonzentration am Inneren Este-Sperrwerk (km 11,0) vor. Abbildung 15 zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen und der simulierten Ganglinie der Schwebstoffkonzentration. Insgesamt weist die simulierte Ganglinie alle wesentlichen Charakteristiken der gemessenen Ganglinie auf. Die stellenweise etwas größeren Abweichungen sind möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die gemessene Ganglinie im Bereich der Böschung erhoben wurde, während es sich bei der simulierten Ganglinie um einen querschnittsgemittelten Wert handelt.

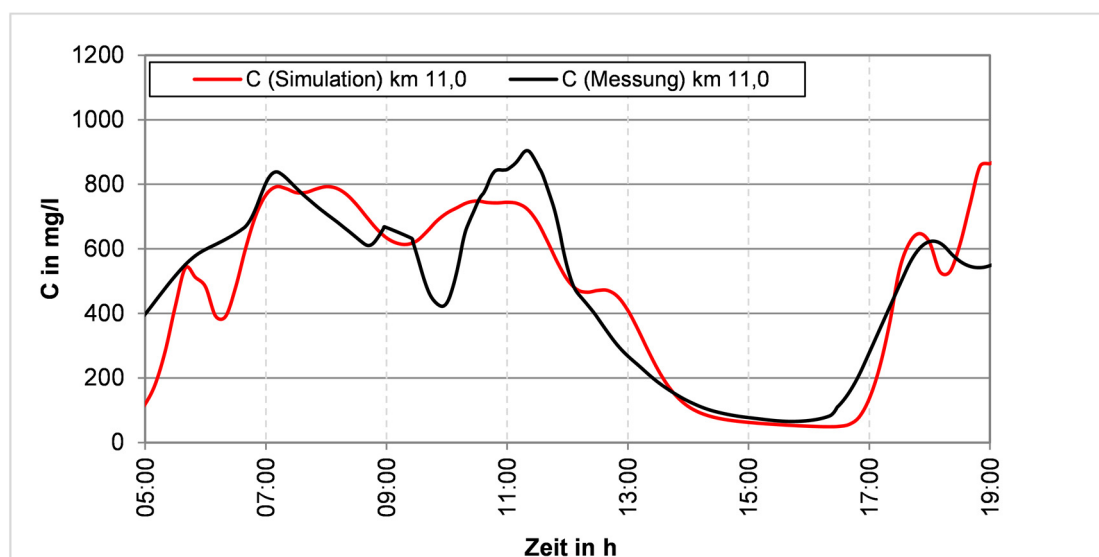
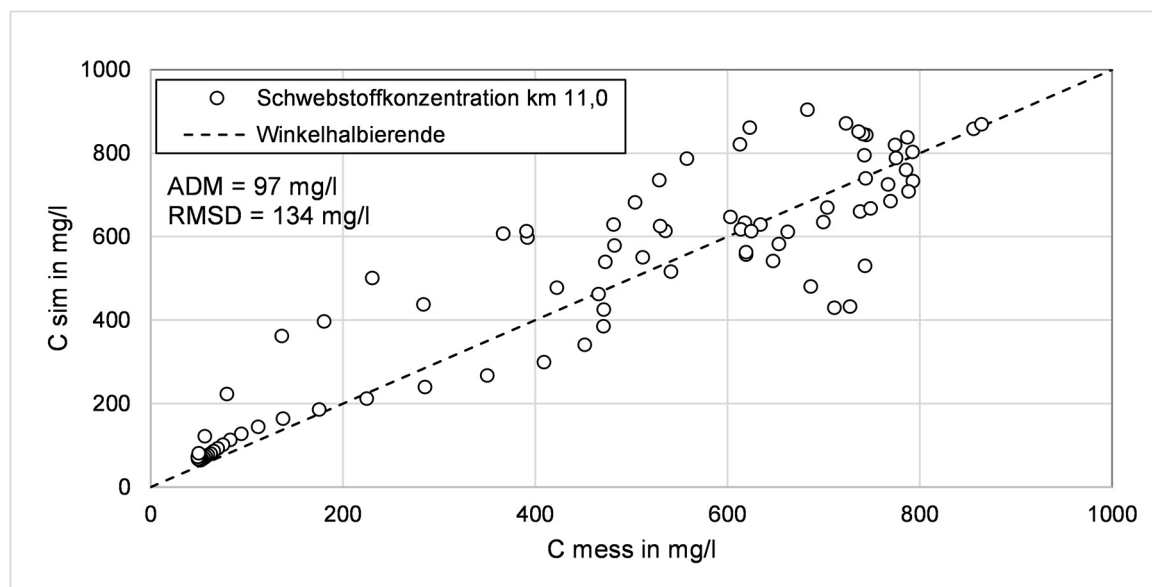


Abbildung 15: Gemessene und simulierte Schwebstoffkonzentration in der Este (22.07.2014 05:00 - 22.07.2014 19:00)

Abbildung 16 zeigt ein Streudiagramm, in dem die simulierte Schwebstoffkonzentration über die gemessene Schwebstoffkonzentration aufgetragen ist. Die Werte streuen gleichmäßig innerhalb einer Bandbreite um die Winkelhalbierende. Die mittlere Abweichung beträgt  $ADM = 97 \text{ mg/l}$ , der RMSD beträgt  $134 \text{ mg/l}$ . Im Vergleich zu dem gesamten Spektrum der Schwebstoffkonzentration ( $50 - 900 \text{ mg/l}$ ) betragen die berechneten Abweichungen weniger als 20 Prozent, was auf eine gute Anpassung hindeutet.



**Abbildung 16: Streudiagramm der gemessenen und simulierten Schwebstoffkonzentration in der Este bei km 11,0 (04.03.2008 15:00 - 05.03.2008 09:00, Messdaten: WSA Hamburg)**

## 2.4 Sensitivitätsstudien

In den vergangenen drei Jahrzehnten entwickelten sich numerische Modelle zu einem der wichtigsten Instrumente des Wasserbaus. Sie werden u.a. eingesetzt zur i) Beschreibung der hydrologischen, hydraulischen und morphologischen Prozesse und ii) zur Beurteilung der Auswirkungen natürlicher oder anthropogener Einflüsse auf Gewässer- und Gewässersysteme. Die derzeit zur Verfügung stehende Vielfalt von Modellen, die je nach Modelltyp und -ansatz für unterschiedliche Fragestellungen einsetzbar ist, stellt in Verbindung mit den heute verfügbaren Rechenressourcen (Cluster-Rechner) die Grundlage für nahezu jede wasserbauliche Problemstellung dar. Beim Einsatz numerischer Modelle ist stets zu beachten, dass die Ergebnisse mit unterschiedlich großen Unsicherheiten behaftet sind, die sich wie folgt untergliedern (Kopmann et al. 2004; Clyde und George 2004; Gourley und Vieux 2006; Murray 2007; Scheel et al. 2015):

- Unsicherheiten in den Randbedingungen durch natürliche räumliche und zeitliche Variation, die z.B. auf Niederschlags- und Windverhältnisse, unbekannte Trends oder Klimawandel zurückzuführen sind,
- Parameterunsicherheiten durch fehlendes Wissen oder fehlende Daten, die z.B. auf empirische Ansätze (z.B. Rauheit), Messverfahren, Messfehler, Auswertemethoden von Messdaten, begrenzte Datenverfügbarkeit zurückzuführen sind,

- Modellunsicherheiten durch die unvollständige Abbildung des realen Systems im Modell, die auf Modellierungsansätze (Modelldimension), numerische Methoden, Parametrisierungen von nicht erfassten physikalischen Prozessen, Zahlen- und Rechengenauigkeiten zurückzuführen sind und
- Unsicherheiten mit unbekanntem Quellen wie fehlerhafte Messungen, fehlerhafte Annahmen, Modellfehler etc.

Jeder einzelne Faktor für sich stellt einen Freiheitsgrad dar, der den Unsicherheitsbereich der Modellergebnisse beeinflusst. Diese Unsicherheiten treten natürlich auch bei der integrierten Modellierung zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels (vgl. Abschnitt 2.3) auf.

Die Unsicherheiten in den Randbedingungen sind sehr groß, da die entscheidenden Einflussfaktoren wie die Veränderung des Klimas und der Anstieg des Meeresspiegels nicht vorhersagbar sind. Naturgemäß enthält auch jedes Modell Parameterunsicherheiten und Modellunsicherheiten. Diese können durch die Wahl eines geeigneten Modells, bzw. mehrerer gleichartiger Modelle, die parallel betrieben werden (Multi-Modellansatz), und eine umfassende Kalibrierung und Validierung zwar deutlich verringert, jedoch nicht komplett vermieden werden. Zudem führt der verkettete Einsatz der Modelle zu einer Akkumulation der Unsicherheiten jedes einzelnen Modells. Vor allem das letzte Glied der Modellkette (Abschnitt 2.3), die Klasse der Sedimenttransportmodelle weist große Unsicherheiten auf. Insbesondere die Modellierung des Transports kohäsiver Sedimente hängt von einer größeren Anzahl von Parametern und Prozessen ab (Abschnitt 3.3.3).

Den ganzen Unsicherheiten bei der Impaktmodellierung steht der Wunsch nach einer möglichst genauen Vorhersage der Auswirkungen gegenüber. Wird beispielsweise für eine Region wie die Elbmarsch ein hoher Grad der Betroffenheit festgestellt, kann dies enorme Konsequenzen für die Gesellschaft nach sich ziehen. Ein geeigneter Lösungsansatz zum Umgang mit den genannten Unsicherheiten sind Sensitivitätsstudien. Bei Sensitivitätsstudien werden die als kritisch identifizierten Parameter oder Randbedingungen im Rahmen sinnvoller Grenzen variiert. Das Ziel ist es, zu überprüfen inwieweit der variierte Parameter bzw. die Parameterkombination Einfluss auf das Modellergebnis haben. Auf diese Weise kann der Unsicherheitsbereich eingegrenzt werden. Werden die Sensitivitäten der Modellergebnisse, z.B. mit Hilfe stochastischer Verfahren, mathematisch analysiert, können Unsicherheiten auch quantifiziert und statistisch beschrieben werden.

### 3. Unterelbe

Die Unterelbe steht in ständiger Wechselwirkung mit ihren Nebenflüssen. Dabei ist der Einfluss, der von der Unterelbe auf die Nebenflüsse ausgeübt wird, deutlich größer als im umkehrten Fall. Dennoch spielen die Nebenflüsse bei einigen Fragestellungen eine wichtige Rolle, so dass diese nicht vernachlässigt werden sollten. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Nebenflüssen der Unterelbe. Allerdings setzt die Bearbeitung dieser Fragestellungen aufgrund des prägenden Einflusses eine eingehende Betrachtung der Rahmenbedingungen in der Unterelbe voraus. Die hydrologischen und die morphologischen Verhältnisse in den Unterläufen der Nebenflüsse werden maßgeblich durch die Tide- und Sedimentdynamik der Unterelbe geprägt. Mit der Flut werden Wasser und Sedimente ein- und mit der Ebbe wieder ausgetragen. In Abhängigkeit der Wasserstands- und Schwebstoffverhältnisse in der Elbe sowie der Binnenabflüsse der Nebengewässer, die ebenfalls Schwebstoffe mitführen, werden Wasser und Sedimente kurz- oder längerfristig in den Unterläufen gespeichert und bei entsprechenden Verhältnissen zumindest teilweise wieder freigegeben. Dadurch werden die Tideverläufe von Wasserstand, Fließgeschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentration in der Elbe insgesamt gedämpft, was wiederum auch Einfluss auf die Sedimentdynamik in der Elbe hat. Außerdem bestimmen die Wasserstände in der Unterelbe die Steuerung der Mündungssperrwerke. Bei erhöhten Wasserständen und Sturmfluten werden diese geschlossen. In der Folge kommt es zu einer weitgehenden Beruhigung der Strömung und zum Aufstau des Binnenabflusses hinter den Sperrwerken. Eine langandauernde Sperrung über mehrere Tiden kann in Verbindung mit einem hohen Binnenabfluss zu Überflutungen der Niederungen entlang der Nebenflüsse führen. Außerdem können Schwebstoffe während der andauernden Sperrung aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten nahezu ungestört sedimentieren. Dementsprechend setzen Untersuchungen von Fragestellungen, die die Nebenflüsse betreffen, stets die eingehende Betrachtung der Rahmenbedingungen in der Unterelbe voraus. Dies geschieht in den nachfolgenden Abschnitten, in denen die relevanten Informationen zur Unterelbe aufgearbeitet und zusammengefasst dargestellt werden. Im Einzelnen fasst der Abschnitt 3.2 die flussbaulichen Maßnahmen an der Unterelbe, den Nebenflüssen und im Einzugsgebiet zusammen, die z.T. zu massiven Veränderungen führten. In Abschnitt 3.3 werden die hydrologischen und morphologischen Rahmenbedingungen aufgearbeitet und zusammengefasst. In diesem Zusammenhang werden auch die maßgeblichen hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse beschrieben. Im Gegensatz zu bestehenden Arbeiten, in denen dies bereits für die Unterelbe geschehen ist, wie z.B. in (Boehlich und Strotmann 2008; Eichweber 2005; Kappenberg und Fanger 2007; BFG 2014; Siefert 1998), erfolgt die Aufarbeitung der Rahmenbedingungen in diesem Fall stets aus dem Blickwinkel der Nebenflüsse.

#### 3.1 Unterelbe zwischen Geesthacht und Cuxhaven

Der Abschnitt der Elbe zwischen dem Wehr bei Geesthacht (km 585,9) und der Mündung in die Nordsee bei Cuxhaven (km 727,7) hat eine Länge von rund 142 km (Abbildung 17). Für diesen Abschnitt werden in der Literatur sowie im Sprachgebrauch unterschiedliche Bezeichnungen verwendet (Rohde 1971; IKSE 2005; Thode und Eichweber 2011). Im Rahmen dieser Arbeit wird in Anlehnung an (IKSE 2005) der Begriff *Unterelbe* verwendet. Die *Unterelbe* untergliedert sich in die drei Teilabschnitte *Obere Tideelbe* (km 585,9 - 609,0), *Hamburger Stromspaltungsgebiet* (km 609,0 - 625,3) und die *Untere Tideelbe* (km 625,3 – 727,7) (ebd.).



und erfordern umfangreiche Anpassungsmaßnahmen sowie eine regelmäßige Unterhaltung der Unterelbe. Ein weiterer bedeutsamer Beitrag zur Wirtschaftsleistung stammt aus der Landwirtschaft, die von den fruchtbaren Böden und dem gemäßigten Klima der Elbmarsch profitiert. Das Alte Land zwischen Buxtehude und Stade zählt mit einer Baumobstfläche von etwa 1.000 ha und einer jährlichen Apfelerntemenge von über 300.000 t zu den bedeutendsten Obstanbaugebieten Mitteleuropas (Görgens 2011). Die zunehmende Intensivierung der Nutzung der Marschen als Anbaufläche für die Landwirtschaft sowie als Wohnraum erforderte und erfordert die Umsetzung von umfangreichen Maßnahmen zum Hochwasserschutz und zur Entwässerung des Hinterlandes. Damit ist natürlich auch die fortlaufende Unterhaltung der Bauten verbunden.

Die Flächen der Elbmarsch weisen Geländehöhen zwischen -1,5 und 2,5 m ü. NHN auf und sind in Abbildung 17 in Beige dargestellt. Der Übergang der Elbmarsch zur Geest ist deutlich erkennbar an einem abrupten Höhengsprung. Die Breite der Elbmarsch beträgt nahe Hamburg etwa 10 km und nimmt in Richtung Nordsee auf 20 bis 35 km zu. Diese tiefliegenden Flächen sind Teil des Urstromtals der Elbe, das durch das Schmelzwasser der Gletscher der letzten Eiszeit vor etwa 10.000 Jahren geformt wurde. Der anschließend ansteigende Meeresspiegel führte zu einer regelmäßigen Überflutung der Elbmarsch. Mitgeführte Schwebstoffe lagerten sich ab und führten zu einem Anwachsen der Flächen.

## **3.2 Flussbauliche Maßnahmen**

Seit dem Beginn der intensiven Besiedlung der Gebiete entlang der Unterelbe um ca. 1000 n. Chr. werden flussbauliche Veränderungen an der Unterelbe, deren Einzugsgebiet und den Nebenflüssen vorgenommen. Flussbauliche Veränderungen lassen sich grundsätzlich unterscheiden in i) Maßnahmen zur Sicherung des Siedlungs- und des landwirtschaftlich genutzten Raumes und ii) Maßnahmen zur Verbesserung der Schiffbarkeit.

### **3.2.1 Sicherung des Siedlungs- und des landwirtschaftlich genutzten Raumes**

Die Fertigstellung einer geschlossenen Deichlinie im Bereich der Elbmarsch im 12. und 13. Jh. verwandelte das (nun ehemalige) Schwemmland in Deichhinterland, das fortan nicht mehr regelmäßig überspült wurde. Dementsprechend lagerten sich keine Schwebstoffe mehr ab und das Anwachsen der Marschflächen war beendet. Mit der Errichtung der Deich wurde der Bau von Anlagen zur Entwässerung der Flächen im Deichhinterland erforderlich. Ein künstliches Vorflutersystem aus Gräben, Wettern und Kanälen wurde angelegt, um Niederschlags- und Grundwasser zu sammeln und in die Vorfluter zu entwässern. Die Entwässerung durch den Deich wurde zunächst über Siele bewerkstelligt. Ab dem 16. Jh. kamen immer mehr Schöpfmühlen hinzu. Im 20. Jh. wurden diese zunächst durch Dampfschöpfwerke und später durch elektrisch betriebene Schöpfwerke abgelöst (Gesellschaft für Schleswig-Holsteinische Geschichte 2015). Heute erfolgt die Entwässerung der Elbmarsch größtenteils über Schöpfwerke (AG Niederungen 2050 2014). Durch die fortwährende Entwässerung des Deichhinterlandes traten vor allem im Bereich mooriger Untergründe Setzungen auf, wodurch die Höhe des Deichhinterlandes im Verhältnis zum mittleren Wasserstand der Elbe immer weiter abnahm (Eichweber 2005). Im Bereich der Elbmarsch sind vor allem Flächen der Wilstermarsch, die zwischen dem Nord-

Ostsee-Kanal (NOK) und der Stör liegt, von Setzungen betroffen (Gesellschaft für Schleswig-Holsteinische Geschichte 2015).

In der Folge der schweren Nordseesturmfluten Ende Januar 1953, die vor allem in den Niederlanden und Flandern enorme Schäden verursachte, und im Februar 1962, die die deutsche Nordseeküste und die Elbe sehr schwer traf, wurde die Küstenschutzstrategie im Bereich der deutschen Nordseeküste überarbeitet. Die neue Strategie sah unter anderem eine deutliche Verkürzung der ersten Deichlinie der Elbe durch Vordeichungen und die Errichtung von Sturmflutsperrwerken an den Mündungen der Nebenflüsse vor (Schleswig-Holstein Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1963); (Niedersachsen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1962). Eine verkürzte Deichlinie führt insgesamt zu einem geringeren Unterhaltungsaufwand, erleichtert die Deichverteidigung und vermindert nicht zuletzt das Schadensrisiko (Gätjen 1977).

Nach dem Abschluss der Errichtung der Sperrwerke und weiteren Vordeichungen beträgt die Länge der ersten Deichlinie an der Elbe rund 270 km. Mit der Verkürzung der Deichlinie gingen der Verlust von Flutraum und Ablagerungsflächen für Sedimente einher (Thode und Eichweber 2011). Insgesamt wurden an der Unterelbe zwischen 1967 und 1982 ca. 140 km<sup>2</sup> Außendeichsflächen durch Vordeichungen zu Binnendeichsflächen (Jorzick et al. 1989; Deutschland und Planungsgruppe Ökologie + Umwelt Nord 1997). Zwischen 1955 und 2007 wurden der Flutraum und die Außendeichsflächen der Elbe durch Küstenschutzmaßnahmen sogar um mehr als 200 km<sup>2</sup> verringert (Freitag et al. 2007, MLUR 2011). Die wesentlichen Baumaßnahmen zur Sicherung des Siedlungs- und landwirtschaftlich genutzten Raumes sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

**Tabelle 3: Baumaßnahmen in und an der Unterelbe zur Sicherung des Siedlungs- und des landwirtschaftlich genutzten Raumes (aus Kappenberg und Fanger 2007, ergänzt nach Siefert 1998, Eichweber 2005 und IKSE 2005)**

<b>Jahr</b>	<b>Baumaßnahme</b>
Ab 11. Jh.	Erste Runddeiche
12./13. Jh.	Geschlossene Deichlinie um die Elbe
Nach 1300	Abdämmung der Gose Elbe
1471	Abdämmung der Dove Elbe
16. Jh.	Deicherhöhungen für ganzjährigen Hochwasserschutz
1951	Abtrennung der Gose- und Dove Elbe durch Bau der Tatenberger Schleuse
1962	Abdämmung der Alten Süderelbe im Bereich Finkenwerder zum Mühlenberger Loch
Nach 1962	Eindeichung mehrerer Nebenelben: Borsteler Binnelbe mit Hahnöfer Sand (1975)
1965-1970	Aufspülung Außendeichsflächen Bützflether Sand
1967	Sturmflutsperrwerke Este, Lühe, Freiburger Hafentriel
1968	Sturmflutsperrwerk Oste
1966-1969	Sturmflutsperrwerke Krückau, Pinnau
1967-1969	Vordeichung Niederungen von Krückau und Pinnau
1970-1972	Vordeichung Bützflether Sand
1971	Sturmflutsperrwerk Schwinge
1971-1974	Sturmflutsperrwerk Ilmenau
1972-1975	Sturmflutsperrwerk Stör
1978	Sturmflutsperrwerk Wedeler Au
1975-1976	Vordeichung Haseldorfer Marsch
1967-1976	Vordeichung/Deicherhöhung Nordkehdingen von der Ostmündung bis Freibug
1976-1978	Vordeichung/Deicherhöhung vom Asseler Sand und Krautsand
1978	Sturmflutsperrwerk Wischhafener Süderelbe, Siel am Ruthenstrom Krautsand

In den letzten Jahrzehnten wurden die Hochwasserschutzanlagen laufend ertüchtigt und optimiert. Die Basis hierfür sind langfristig angelegte Programme wie die Generalpläne Küstenschutz (Schleswig-Holstein, Niedersachsen) und das Bauprogramm für den Hochwasserschutz (Hamburg). Derzeit betragen die Deichhöhen entlang der Tideelbe 7,5 bis 9,25 m ü. NHN (Schleswig-Holstein 2013; NLWKN 2007, LSBG 2012).

### 3.2.2 Verbesserung der Schiffbarkeit

Neben der Nutzung der Ufer als Siedlungsraum und zu landwirtschaftlichen Zwecken wurde die Unterelbe intensiv als Handelsweg genutzt. Wichtige Handelsplätze um ca. 1000 n. Chr. waren die Städte Hamburg, Bardowick, Buxtehude, Itzehoe und Stade (Rohde 1971). Während alle anderen wichtigen Handelsplätze an Nebenflüssen der Elbe lagen, hatte Hamburg einen direkten Zugang zur Elbe. Mit zunehmenden Schiffgrößen wurde dies zu einem immer bedeutsameren Vorteil gegenüber den anderen Handelsplätzen, da die Wassertiefen in der Elbe größer waren als in den Nebenflüssen. Dementsprechend konnten andere Handelsplätze von Schiffen ab einer gewissen Größe nicht mehr problemlos angefahren werden. Jedoch reichten auch die Wassertiefen der Elbe mit der Zeit nicht mehr aus. Die immer weiter zunehmende Größe des Hamburger Hafens und der Schiffe, die die Unterelbe befuhren, machten schließlich auch in der Elbe zunehmende Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen erforderlich, wie z.B.:

- Fahrrinnenbegradigungen, -vertiefungen und -verbreiterungen
- Bau von Strombauwerken
- Aufspülen von Sänden
- Bau von Hafenanlagen, inklusive der Verfüllung von Hafenbecken.

Bis zum 19. Jahrhundert beschränkten sich die Maßnahmen weitgehend auf das Hamburger Stromspaltungsgebiet, bevor schließlich auch der Ausbau der unteren Tideelbe erforderlich wurde (Rohde 1971). Die erste Fahrrinnenvertiefung der unteren Tideelbe erfolgte im Jahr 1859 auf 5,3 m unter MThw. Etwa 100 Jahre später war die Fahrrinne durchgehend auf 10 m unter MThw ausgebaut. Zwischen 1957 und 2000 erfolgten vier weitere Vertiefungen auf letztendlich 14,4 m unter MTnw. Beim Vergleich der Tiefen ist zu beachten, dass das zugrunde gelegte MTnw seit den 1950er Jahren vor allem in dem stromauf gelegenen Abschnitt mehrfach nach unten korrigiert wurde. Dadurch fällt die absolute Vertiefung noch größer aus. Tatsächlich betrug die Vertiefung der Hamburger Delegationsstrecke von 10 m unter MTnw auf 13,5 m unter MTnw zwischen 1950 und 1978 nicht 3,5 m sondern 4,3 m (Siefert 1998). Abschnittsweise Verbreiterungen der Fahrrinne erfolgten nicht nur im Rahmen der Vertiefungen, sondern auch im Rahmen von Deichbau- und Aufspülungsmaßnahmen. Im Zeitraum zwischen 1950 und 1995 wurden insgesamt 120 Mio. m<sup>3</sup> Material aus der Elbe für derartige Maßnahmen entnommen (Siefert 1998). Mit den Fahrrinnenvertiefungen gingen Maßnahmen zur Stromregulierung einher, wie z.B. der Bau von Leitdämmen oder das Aufspülen von Sänden und Inseln, wodurch der Abfluss auf den Hauptstrom konzentriert wurde. Außerdem führten Umstrukturierungen im Hamburger Hafen dazu, dass die wasserseitigen Hafensflächen insgesamt um ca. 85 ha abnahmen (Siefert 1998). Die wesentlichen Baumaßnahmen zur Verbesserung der Schiffbarkeit der Unterelbe sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

**Tabelle 4: Baumaßnahmen in der Unterelbe zur Verbesserung der Schiffbarkeit (aus Kappenberg und Fanger 2007, ergänzt nach Rohde, Siefert 1998, Eichweber 2005 und IKSE 2005)**

<b>Jahr</b>	<b>Baumaßnahme</b>
9. Jh.	Erste Hafenanlagen
15. Jh.	Erste Inseldurchstiche und Flussregulierungen (Norderelbe, Alster)
1604	Vervollständigung der Norderelbe
1616	Steinschüttungen bei Scheelenkuhlen, Brokdorf, Hollerwettern
1730	Leitdamm bei der Kugelbaake in Cuxhaven
1859	Fahrrinnenvertiefung auf 5,3 m unter MTnw
1886/87	Fahrrinnenvertiefung im Bereich Blankeneese auf 6,0 m unter MTnw; im Bereich zwischen Altona und Branshausen (Stadersand) auf 8,0 m unter MTnw
1887-1910	Fahrrinnenvertiefung (teilweise) bis zu 10 m unter MTnw
1906-1914	Aufspülung von Schweinesand und Hanskalbsand
1914-1920	Aufspülung von Lühesand
1922-1930	Aufspülung von Pagensand
1934-1936	Errichtung Trischendamm
1936-1950	(mit Kriegsunterbrechung) Ausbau durchgängig auf 10 m unter MTnw
1953-1959	Ausbau Rhinplatte als Maßnahme des 10-m-Ausbaus
1960	Bau des Wehres Geesthacht
1957-1962	Fahrrinnenvertiefung auf 11 m unter MTnw
1967/68	Verbindung von Hanskalbsand und Neßsand durch einen Spüldamm auf 1 m über MThw
1964-1969	Fahrrinnenvertiefung auf 12 m unter MTnw
1964-1969	Ufervorspülungen vom Störleitdamm bis zum Bütteler Hafenpriel
1970-1974	Ufervorspülungen/Befestigungen und Aufspülung einer Pionierinsel in der Lühesander Süderelbe
1972-1977	Aufspülung der Wattflächen „Schwarztonnensand“
1974-1978	Fahrrinnenvertiefung auf 13,5 m unter MTnw, Aufspülungen: Hollerwettern-Scheelenkuhlen, Vorland Glücksstadt, Fährmannssand, Hanskalbsand-Neßsand
1978-1981	Aufspülung von Pagensand
1983-1985	Errichtung von Flügeldämmen zur Nebelnelbe im Bereich der Rhinplatte
1987-1989	Instandsetzung des Leitdammsystems Pagensand-Nord und Bau eines neuen Leitdamms
Bis 1992	Abgrabung Schwarztonnensand
1993	Fahrrinnenvertiefung durch das Freiburger Watt an Fahrrinntiefen des Freiburger Hafenpriels
1950-1995	Rückbau der wasserseitigen Hafенflächen um 85 ha
1991-2000	Fahrrinnenvertiefung auf 14,4 m unter MTnw

### 3.3 Hydrologie und Morphologie der Unterelbe

Wasserstände, Strömungen und Schwebstofftransporte in der Unterelbe werden durch die Gezeiten und den Oberwasserzufluss bestimmt, die sich gegenseitig überlagern. Die Gezeiten schwingen in Form einer Welle von der Nordsee aus kommend in den Mündungstrichter der Unterelbe ein und durchlaufen das Ästuar bis zur Tidegrenze am Wehr Geesthacht. Dabei breitet sich die Tidewelle auch in die tidebeeinflussten Unterläufe der Nebenflüsse aus. Durch die periodische Änderung des Wasserstandes entstehen zeitlich und örtlich variable Gezeitenströmungen, die u.a. einen Transport von gelösten (Salz) und nicht gelösten Stoffen (Schwebstoffe) hervorrufen.

Der Oberwasserzufluss stammt größtenteils aus dem Einzugsgebiet der Elbe stromauf des Wehres bei Geesthacht. Der mittlere Zufluss aus dem Einzugsgebiet der Unterelbe beträgt nur rund ein Zehntel des mittleren Oberwasserzuflusses am Pegel Neu Darchau (vgl. Abschnitt 4.2). Unterhalb des Wehres bei Geesthacht überlagert sich die durch den Oberwasserzufluss stromab gerichtete

Strömung mit den bi-direktionalen Gezeitenströmungen. Mit zunehmender Entfernung vom Wehr nimmt der Einfluss des Oberwassers immer weiter ab. Innerhalb des Ästuars werden Wasserstände, Strömungen und Schwebstofftransporte von einer Reihe an Mechanismen beeinflusst, die in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden.

### 3.3.1 Abflüsse, Wasserstände und Strömungen

#### 3.3.1.1 Maßgebende Prozesse

Beim Durchlaufen des Ästuars wird die Gezeitenwelle verformt durch i) eine variierende Fortschrittsgeschwindigkeit, ii) dissipative Dämpfung infolge Bodenreibung, iii) Konvergenz durch Verengung des Querschnittes und iv) Reflexion an Untiefen oder am Kopf des Ästuars.

Die Fortschrittsgeschwindigkeit hängt von der Wassertiefe ab (Parker 1991), die im Elbe-Ästuar in etwa die gleiche Größenordnung hat wie der Tidehub. Dementsprechend nimmt die Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidekurve zum Tidehochwasser hin zu und zum Tideniedrigwasser hin ab.

Durch die Bodenreibung wird der Strömung Energie entzogen, so dass der Tidehub in Richtung stromauf abnimmt. Aufgrund der variierenden Wassertiefe über die Tidephase hat der Sohlwiderstand einen unterschiedlich großen Einfluss. Mit sinkendem Wasserstand nimmt der Fließwiderstand zu und mit steigendem Wasserstand ab (Dronkers 1986).

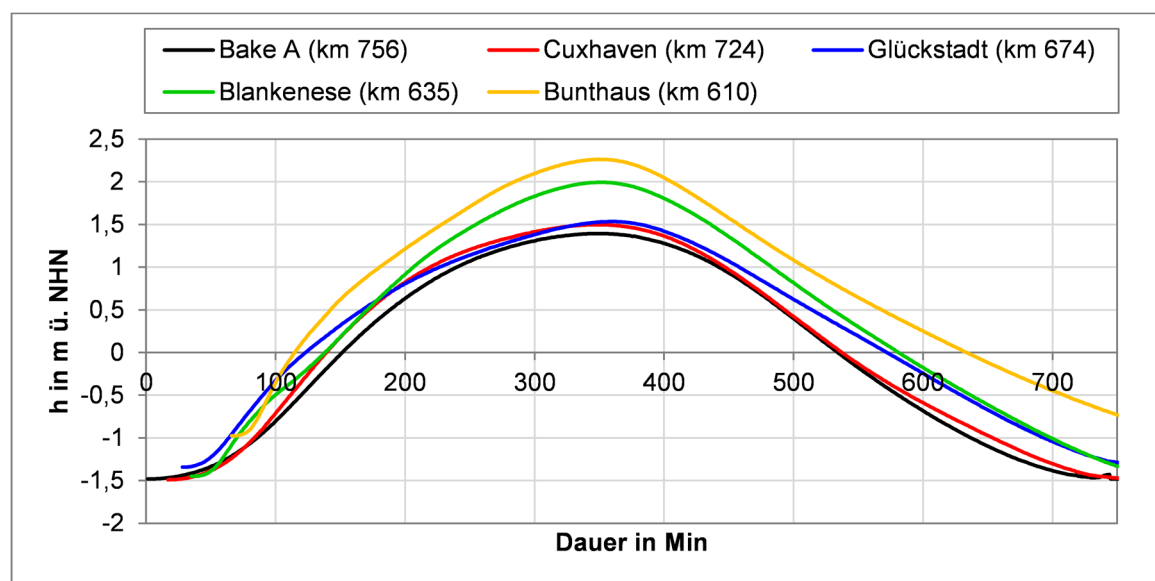
Eine Verjüngung des Ästuars in Richtung stromauf führt zu einer Zunahme des Tidehubs, eine Aufweitung führt zu einer Abnahme des Tidehubs. In Bezug auf den Tidehub wirkt eine Verjüngung der Bodenreibung entgegen. Salomon und Allen charakterisieren Ästuar entsprechend des Verhältnisses der Wirkung dieser beiden Prozesse als hypersynchron, synchron und hyposynchron (Salomon und Allen 1983). Das Elbe-Ästuar gehört im heutigen Zustand zum Typ hypersynchron, d.h. der Energiegewinn pro Breitenmeter durch die Verjüngung überwiegt den Verlust durch Bodenreibung. Der Tidehub nimmt in Richtung stromauf zu. Ihren maximalen Tidehub verzeichnet die Elbe heutzutage im Bereich des Hamburger Stromspaltungsgebietes. Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts die Situation eine andere. Der Tidehub nahm von der Mündung bis zur Tidegrenze stetig ab (Eichweber 2005), weshalb die Elbe zu dem Zeitpunkt zum Typ hyposynchron zählte.

Durch Reflexion an Untiefen oder Bauwerken kann der Tidehub der Tidewelle verstärkt werden. Der Charakter der Tidewelle ändert sich im Fall einer Reflexion von einer fortschreitenden Welle zu einer stehenden Welle, wodurch die Gezeitenströmungen bei Hoch- und Niedrigwasser verschwinden (Kappenberg und Fanger 2007).

Die aufgezählten grundlegenden Prozesse sind im Wesentlichen für die asymmetrische Verformung der Tidewelle verantwortlich. Der Grad der Verformung variiert in Abhängigkeit von der Position im Ästuar, was im Folgenden am Beispiel ausgewerteter Messdaten verdeutlicht wird. Grundsätzlich wird die Asymmetrie der Tidekurve in Form von unterschiedlichen Dauern des Anstiegs bzw. des Abfallens des Wasserstandes deutlich. Diese unterschiedlichen Dauern

führen auch zu ungleichen Verläufen der Strömungsgeschwindigkeiten und zu ungleichen maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten (Boon und Byrne 1981).

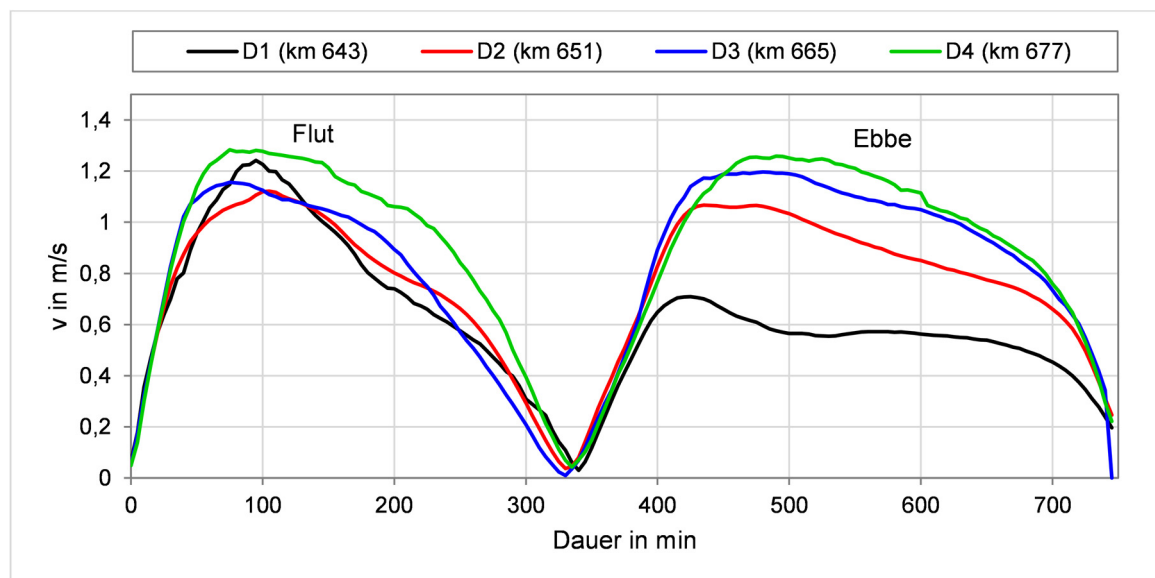
Abbildung 18 verdeutlicht die in Richtung stromauf zunehmende Asymmetrie am Beispiel von tidegemittelten Verläufen des Wasserstandes an unterschiedlichen Positionen in der Unter- und Außenelbe. Im Mündungsbereich der Außenelbe bei Bake A zeigt die Tidewelle einen nahezu sinusförmigen Verlauf. Im Übergangsbereich von der Unter- zur Außenelbe bei Cuxhaven ist bereits ein Trend zu einem steiler werdenden Flutast und einem abgeflachten Ebbast zu erkennen. Dieser Trend setzt sich in Richtung stromauf weiter fort und zeigt seine stärkste Ausprägung zwischen Glückstadt und Blankenese. In diesen Abschnitt mündet die Mehrzahl der Nebenflüsse der Unterelbe.



**Abbildung 18: Mittlere Tideverläufe des Wasserstands für das Jahr 2010 an verschiedenen Positionen in der Unterelbe (Daten: WSV)**

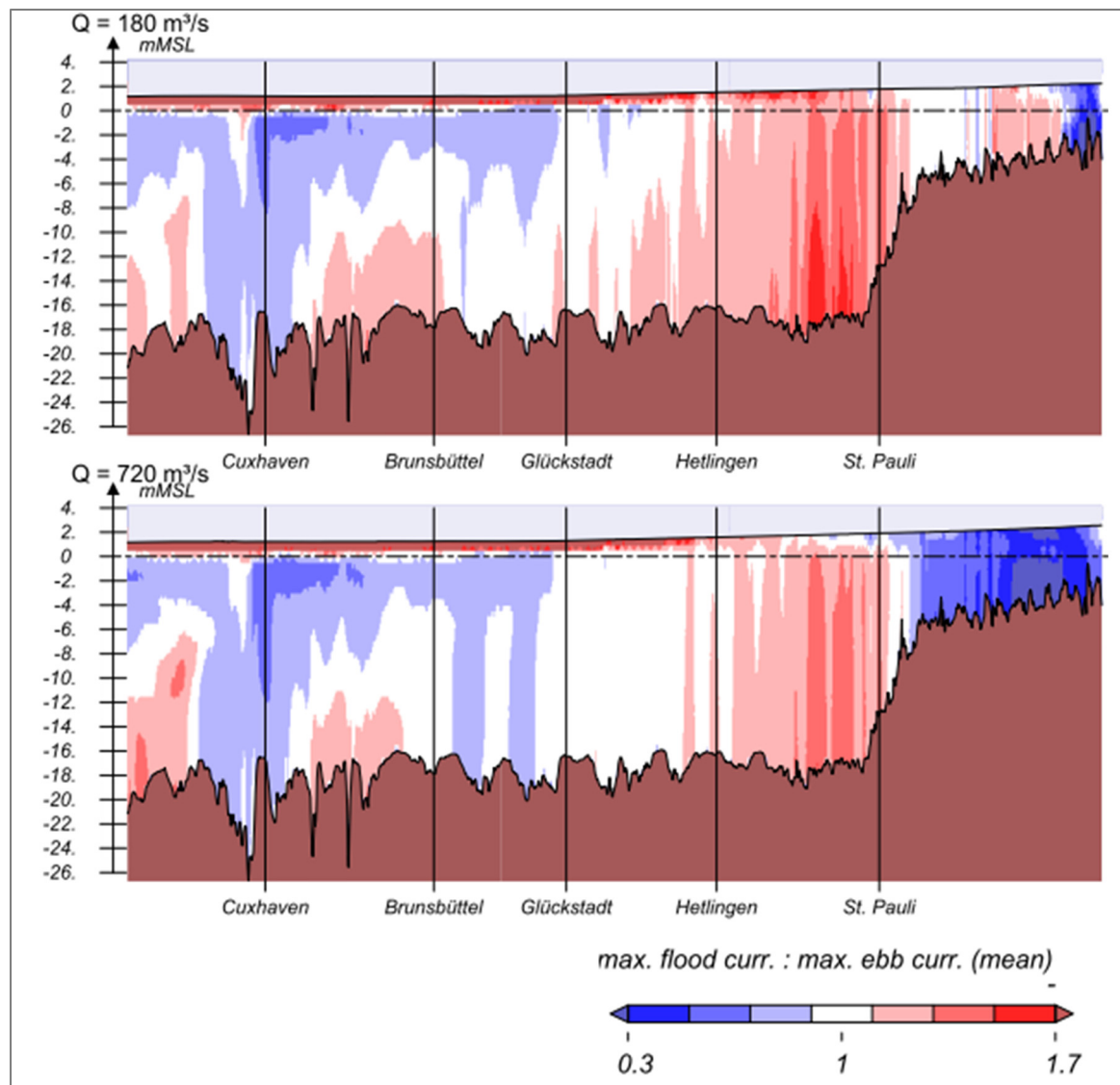
An den Positionen aus Abbildung 18 werden keine Strömungsparameter aufgezeichnet. Daher wird zur Veranschaulichung der Verformung der Tideverläufe der Strömungsgeschwindigkeit auf die Messwerte der Dauermessstationen D1 bis D4 zurückgegriffen. Diese werden durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) betrieben und befinden sich im Abschnitt zwischen Glückstadt und Blankenese, also genau in dem Abschnitt, in dem der Tideverlauf des Wasserstands eine deutliche Zunahme der Asymmetrie in Richtung stromauf zeigt. Abbildung 19 zeigt am Beispiel der tidegemittelten Strömungsgeschwindigkeiten für das Jahr 2010, dass auch die Strömungsgeschwindigkeiten eine zunehmende Asymmetrie in Richtung stromauf aufweisen. Nachfolgend werden die Asymmetrien kurz beschrieben. Die Flutstromdauer ist an allen vier Positionen kürzer als die Ebbstromdauer. In Richtung stromauf ist eine leicht abnehmende Flutstromdauer erkennbar. Da die Tidedauer konstant bleibt, geht damit eine zunehmende Ebbstromdauer einher. Die maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten unterscheiden sich an den einzelnen Stationen zum Teil sehr deutlich. Das Verhältnis  $v_{\max, \text{Flut}} / v_{\max, \text{Ebbe}}$  zeigt an den Stationen D1 eine deutliche und an Station D4 eine leichte Flutstromdominanz. An Station D2 ist das Verhältnis ausgeglichen und an Station D3 herrscht Ebbstromdominanz. Anders als beim Tidehub und der Flutstromdauer ist bei den Fließgeschwindigkeiten keine monotone Veränderung in Richtung stromauf zu erkennen. Die Stauwasserdauer, also die Zeit, in der die

Fließgeschwindigkeit einen gewissen Wert (z.B. 0,2 m/s) unterschreitet, ist an allen vier Positionen um den Flutstromkenterpunkt länger als um den Ebbstromkenterpunkt.



**Abbildung 19: Mittlere Tideverläufe der oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeit für das Jahr 2010 an verschiedenen Positionen in der Unterelbe (Daten: WSV)**

Die in Abbildung 18 und Abbildung 19 beispielhaft dargestellten Auswertungen lassen Aussagen zu, die Gültigkeit für die jeweilige Position besitzen, an der die Daten erhoben wurden. Um Aussagen über die Abschnitte zwischen den Positionen treffen zu können, müssen Interpolationsverfahren eingesetzt werden. Die einfachste Art der Interpolation, die lineare Interpolation, wird den nicht-linearen Effekten, die im Ästuar auftreten, nicht gerecht. Daher werden komplexere Interpolationsverfahren, wie die hydrodynamisch-numerische Modellierung, eingesetzt. Abbildung 20 zeigt das Ergebnis einer hydrodynamisch-numerischen Analyse der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zum Einfluss eines variierenden Oberwasserzuflusses auf das Verhältnis der maximalen Flutstromgeschwindigkeit zur maximalen Ebbstromgeschwindigkeit im Längsschnitt durch die Unterelbe (BAW 2011b). Darin erkennt man unabhängig vom Oberwasserzufluss ebbstromdominante Abschnitte (blaue Einfärbung) um Cuxhaven, zwischen Brunsbüttel und Glückstadt sowie am Oberwasserrand des Längsschnittes. Ein ausgeprägter flutstromdominanter Abschnitt (rote Einfärbung) existiert zwischen St. Pauli und Hetlingen. Hinzu kommen zwei Abschnitte, in denen sohnah eine Ebbstromdominanz (blaue Einfärbung) und oberflächennah eine Flutstromdominanz (rote Einfärbung) auftritt. In Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss verändern sich diese Bereiche. Mit zunehmendem Oberwasserzufluss verringert sich die Flutstromdominanz. Mit abnehmendem Oberwasserzufluss vergrößert sich die Flutstromdominanz. In dem Abschnitt zwischen Glückstadt und St. Pauli, in den die Mehrzahl der Nebenflüsse mündet, dominiert tendenziell der Flutstrom.



**Abbildung 20: Verhältnis der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten zu den maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten in der Unterelbe, gemittelt über einen Spring-/Nippzyklus vom 11.06.2006 – 25.06.2006 unter Variation des Oberwasserzuflusses (aus BAW 2011)**

Weitere Asymmetrien im Verlauf der Fließgeschwindigkeiten sind auf die Vermischung von Süß- und Salzwasser zurückzuführen. Diese Asymmetrien sind in den zuvor dargestellten Abbildungen nicht oder nur von anderen Prozessen überlagert zu erkennen. Das Süßwasser in der Unterelbe stammt überwiegend aus dem Oberwasserzufluss der Elbe (Abschnitt 3.3.1.2) und zu einem geringen Anteil aus den Nebenflüssen (Abschnitt 4.2.1). Das Salzwasser wird mit dem Flutstrom aus der Nordsee in das Ästuar transportiert und weist eine höhere Dichte auf. In Abhängigkeit von den Durchmischungseigenschaften bildet sich eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Schichtung aus. Der Grad der Durchmischung hängt u.a. vom Mengenverhältnis ab, in dem Süß- und Salzwasser in das Ästuar eingetragen werden. Schulz und Simmons unterscheiden in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Volumen, das über den Oberwasserzufluss  $V_{\text{Binnen}}$  eingetragen wird und des Flutprismas an der Mündung  $V_{\text{Mündung}}$  in „gut“ ( $V_{\text{Binnen}} / V_{\text{Flut}} < 0,1$ ), „teilweise“ ( $0,1 < V_{\text{Binnen}} / V_{\text{Flut}} < 0,25$ ) und „schlecht“ ( $V_{\text{Binnen}} / V_{\text{Flut}} > 1,0$ ) durchmischte Ästuarie (Schulz und Simmons 1957). Je nach Oberwasserzufluss fällt die Unterelbe in die Kategorie „teilweise“ oder „gut“ durchmischte (Kappenberg und Fanger 2007).

Im Bereich der Vermischung führen verschiedene Mechanismen zur Ausbildung einer im Tidenmittel stromaufgerichteten Restströmung, die der stromabgerichteten Strömung aus dem Oberwasserzufluss entgegenwirkt. Im Folgenden werden die einzelnen Prozesse kurz beschrieben.

### **Bodennahe Dichteströmung**

Mit den im Längsschnitt geneigten Isopyknen<sup>9</sup> gehen Druckunterschiede einher, aus denen im Tidenmittel eine sohnnahe Restströmung in Richtung stromauf resultiert. Diese dichteinduzierte Strömung wurde erstmals von Postma und Kalle beschrieben (Postma und Kalle 1955) und wird als ästuarine Zirkulation bezeichnet. Dort, wo sich Oberwasserzufluss und ästuarine Zirkulation ausgleichen, bildet sich die Brackwasserzone aus (Kappenberg und Fanger 2007).

### **Gezeiten-Geschwindigkeitsasymmetrie**

Durch die Schichtung werden turbulente Mischungsprozesse gedämpft. Eine bessere Durchmischung bei Flut führt zu einem homogeneren vertikalen Geschwindigkeitsprofil als bei Ebbe, wo die geringere Durchmischung zu einem stärkeren vertikalen Gradienten im Geschwindigkeitsprofil führt. Über einen Tidezyklus gemittelt führt dieser Mechanismus ebenfalls zu einem bodennahen Reststrom in Richtung stromauf. Dieses Phänomen wurde erstmals von Jay und Musiak beschrieben (Jay und Musiak 1994) und wird als Gezeiten-Geschwindigkeitsasymmetrie (Kösters 2010) oder auch als interne Gezeitenasymmetrie (Kappenberg und Fanger 2007) bezeichnet. Beide Mechanismen sind maßgeblich an der Ausbildung von Trübungszonen beteiligt (Burchard und Baumert 1998).

### **3.3.1.2 Oberwasserzufluss**

Am Pegel Neu Darchau, ca. 50 km stromauf vom Wehr Geesthacht, wird seit dem Jahr 1875 der Oberwasserabfluss gemessen. Der Pegel hat ein Einzugsgebiet von ca. 131.950 km<sup>2</sup>, was etwa 89% des gesamten Einzugsgebietes der Elbe ( $A_E = 148.268 \text{ km}^2$ ) entspricht (Freie und Hansestadt Hamburg, Hamburg Port Authority 2012). Aus der 138-jährigen Abflussreihe (1875-2013) ergeben sich ein höchster jemals gemessener Abfluss (HHQ) von 4.400 m<sup>3</sup>/s am 25.03.1880, ein niedrigster jemals gemessener Abfluss (NNQ) von 128 m<sup>3</sup>/s am 01.09.1904 und ein mittlerer Abfluss (MQ) von 710 m<sup>3</sup>/s. Die Ganglinie in Abbildung 21 zeigt die große Variabilität des Abflusses der Elbe am Pegel Neu Darchau. Extrem hohe Abflüsse treten in unregelmäßigen Abständen und zum Teil auch gehäuft auf. Dazwischen sind immer wieder Niedrigwasserphasen zu beobachten.

---

<sup>9</sup> Isopyknen sind Linien gleicher Dichte.

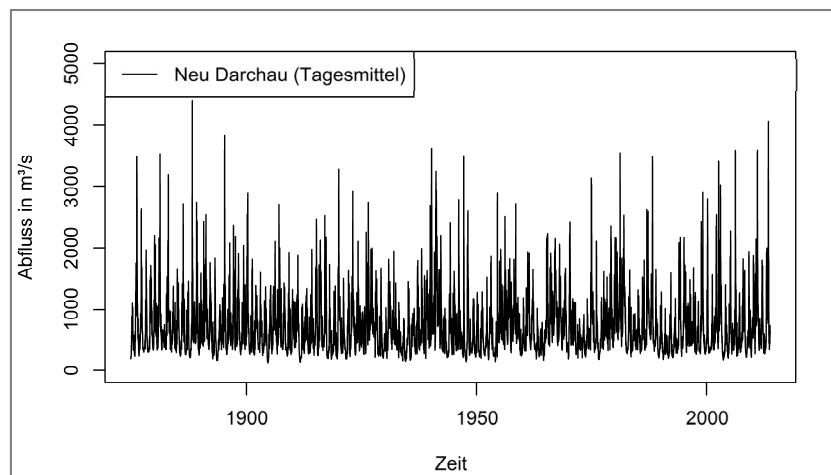


Abbildung 21: Abflussganglinie am Pegel Neu Darchau (1878-2013) (Daten: WSV)

Abbildung 22 zeigt den Jahresgang des Abflusses für den Zeitraum 1998-2013. Von Mai bis November liegt der Median des mittleren Monatsabflusses bei ca. 500 m³/s. Im Dezember und Januar steigt der Wert an und erreicht von Februar bis April Werte von über 1000 m³/s, wobei das Maximum mit knapp 1200 m³/s im März auftritt. Die Kästen geben den Quartilsabstand vom ersten bis zum dritten Quartil an und beinhalten folglich die mittleren 50% der Abflüsse. Die große Ausdehnung der Kästen in den Monaten November bis April zeigt die hohe Varianz des Abflusses in diesen Monaten. Die kleinen Kästen in den verbleibenden Monaten Mai bis Oktober zeigen die geringe Varianz des Abflusses in diesem Zeitraum.

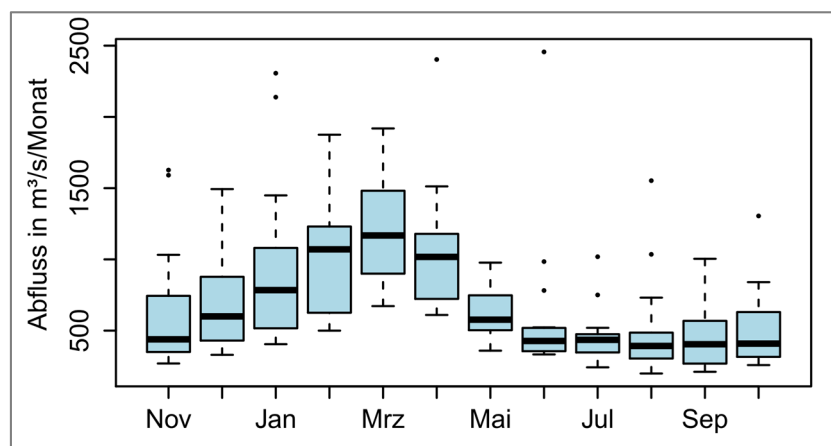


Abbildung 22: Jahresgang der mittleren Monatsabflüsse am Pegel Neu Darchau (1998-2013) (Daten: WSV)

Der dargestellte Jahresgang ist typisch für Gewässer im Übergangsbereich zwischen dem kontinentalen Klima in Osteuropa und dem maritimen Klima in Westeuropa. Im Frühjahr werden hohe Abflüsse durch die Schneeschmelze in den Gebirgslagen hervorgerufen, die häufig von anhaltenden Regenfällen begleitet werden. Die Sommer sind eher trocken, wobei Tiefdruckgebiete bei bestimmten, selten auftretenden Großwetterlagen feuchtwarme Luft aus dem Südwesten nach Norden transportieren, die für intensive und langanhaltende Niederschläge sorgt. In der Folge entstehen hohe Oberwasserabflüsse wie im Juni 2013, wo an vielen Pegeln der höchste Abfluss seit Beginn der Aufzeichnungen gemessen wurde. Im Winter dringen gelegentlich

Tiefdruckgebiete vom Nordatlantik bis weit nach Osten vor und sorgen für starke Niederschläge, die in der Elbe zu Winterhochwassern führen.

### 3.3.1.3 Wasserstände

Der Wasserstand in der Unterelbe wird an mehreren Positionen aufgezeichnet. Die längsten Messreihen liegen für die Pegel Cuxhaven und St. Pauli vor. Vor allem in den 1960er Jahren ist eine Vielzahl von Pegeln hinzugekommen, wodurch eine Analyse gemessener Zeitreihen im Längsschnitt möglich ist. Abbildung 23 zeigt die Entwicklung der mittleren Kenngrößen des Wasserstandes an den Elbe-Pegeln Cuxhaven, Kollmar (nahe der Krückau-Mündung) und Cranz (nahe Este-Mündung) im Zeitraum 1964 – 2013. Die Zeitreihe des MThw am mündungsnahen Pegel Cuxhaven weist im betrachteten Zeitraum einen positiven Trend von 0,113 m auf. Der Trend in der Zeitreihe vom Pegel Kollmar ist mit 0,202 m fast doppelt so groß. Der Trend in der Zeitreihe am Pegel Cranz ist mit 0,34 m sogar dreimal größer. Die Zeitreihen des MTnw weisen im betrachteten Zeitraum 1964-2013 sogar gegensätzliche Trends auf. Während die Zeitreihe am Pegel Cuxhaven einen leichten positiven Trend von 0,06 m aufweist, weist die Zeitreihe am Pegel Kollmar einen negativen Trend von 0,139 m und die Zeitreihe am Pegel Cranz einen negativen Trend von 0,473 m auf.

Die unterschiedlichen Trends an den Pegeln in den Zeitreihen der MThw und MTnw führen zu einem Anstieg des Tidenhubes, der bei Cuxhaven 0,053 m, bei Kollmar 0,341 m und bei Cranz 0,813 m beträgt. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass das MTnw an den Pegeln Kollmar und Cranz insbesondere zwischen 1964 und 1985 stark abgefallen ist. Ab Mitte der 1980er fällt das MTnw weiterhin, jedoch nicht mehr in der Ausprägung wie zuvor. Der größte Anteil der berechneten mittleren Trends der Zeitreihen der Pegel Kollmar und Cranz ist also auf den Zeitraum vor 1985 zurückzuführen.

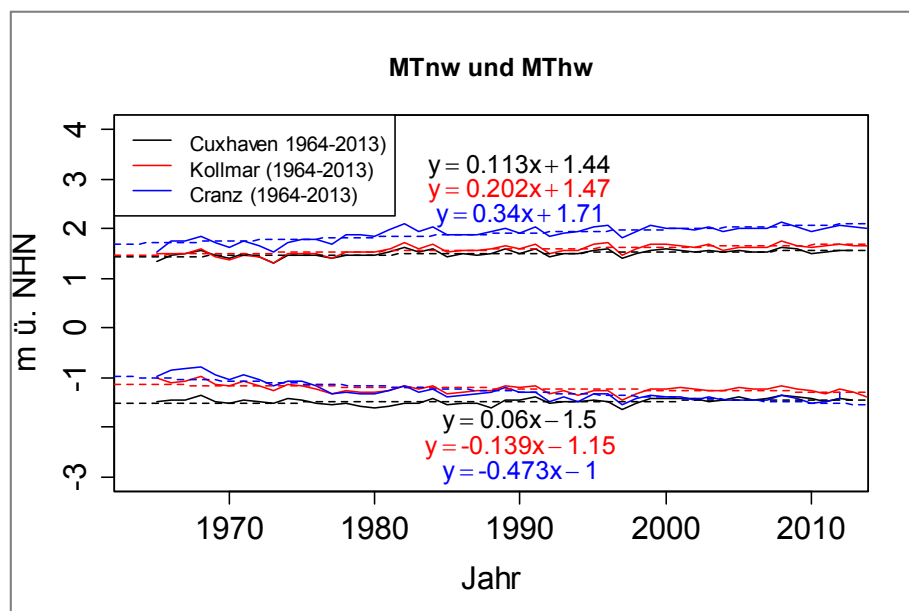


Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung von MThw und MTnw an den Pegeln Cuxhaven, Kollmar und Cranz (Daten: WSA)

In der nachfolgenden Abbildung 24 wird deutlich, dass es im genannten Zeitraum im Abschnitt stromauf der Störmündung zu signifikanten Änderungen der Tidekennwerte gekommen ist. Zwischen der Störmündung und dem Wehr bei Geesthacht ist das MThw angestiegen und das MTnw abgefallen, wodurch der Tidehub zugenommen hat. Die maximalen Änderungen treten im Hamburger Bereich (km 600 – km 640) auf, wo das Tnw um über 0,5 m abgefallen und das MThw um über 0,3 m angestiegen ist. In diesen Abschnitt münden die Nebenflüsse Seeve, Bille, Alster und Este. Es ist zu erwarten, dass sich die deutlichen Änderungen der Tidekennwerte vor allem auf die Strömungen in der Este ausgewirkt haben, da diese nicht wie die anderen genannten Flüsse dauerhaft von der Elbe entkoppelt ist. Auch im Abschnitt zwischen Hamburg (km 600) und der Störmündung (km 679) sind die Änderungen der Tidekennwerte noch deutlich erkennbar. Es ist daher davon auszugehen, dass sich die Strömungen in den einmündenden Nebenflüssen Lühe, Schwinge, Pinnau und Krückau ebenfalls entsprechend verändert haben

Insgesamt beträgt der heutige mittlere Tidehub der Unterelbe nahe der Mündung ca. 3,0 m, im Bereich des Hamburger Hafens ca. 3,7 m und am Wehr Geesthacht ca. 2,3 m. Damit fällt die Unterelbe entsprechend der Klassifizierung von (Davies 1977) und (Hayes 1975) in die Kategorie mesotidales Ästuar (Tidehub zwischen 2,0 und 4,0 m).

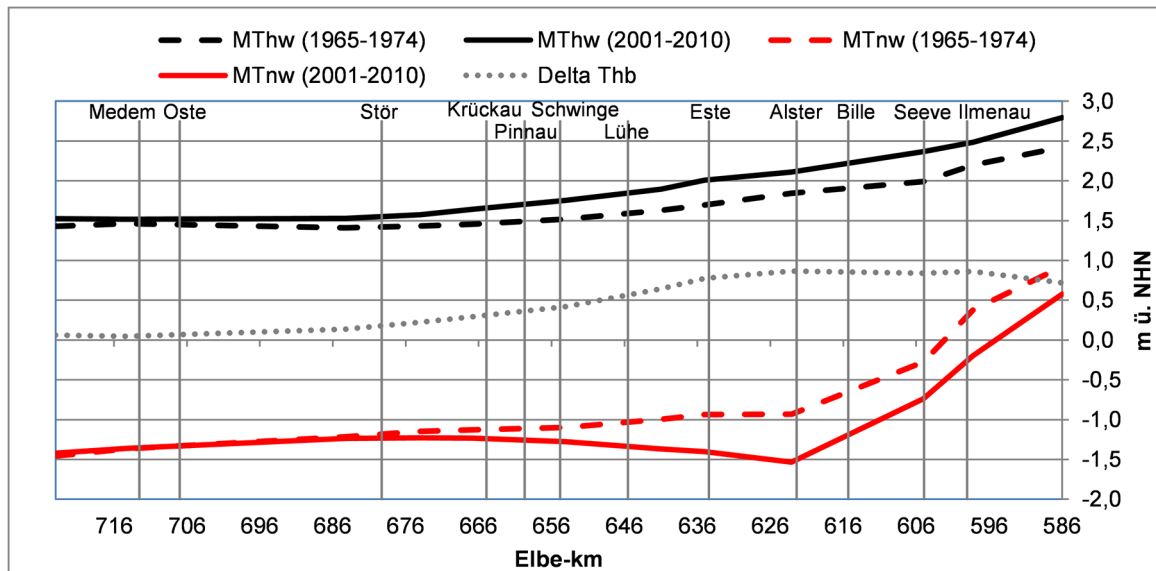


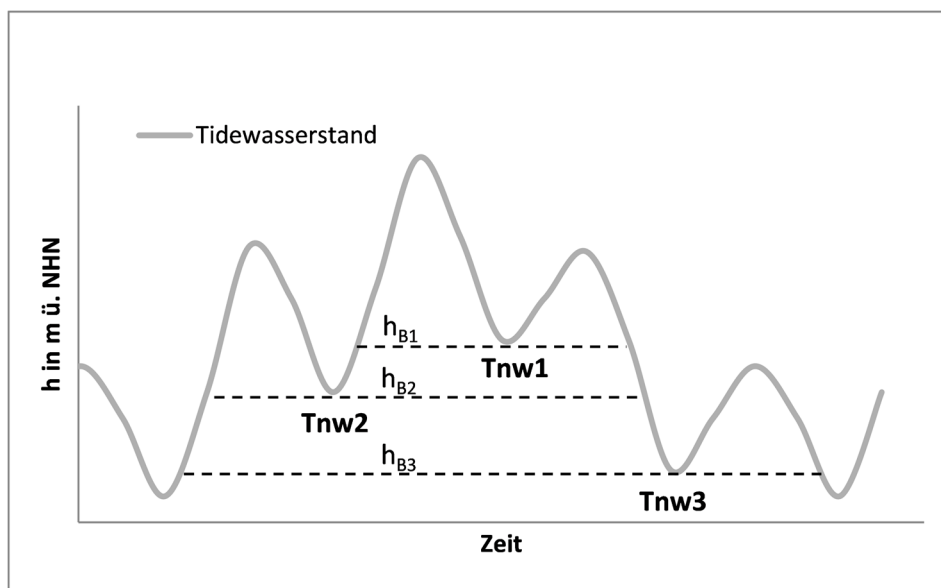
Abbildung 24: Ausgewählte Tidekennwerte in der Unterelbe (Daten: WSV)

In der Unterelbe treten neben den mittleren Wasserständen auch extremere Wasserstände auf. Diese werden in erster Linie durch die Windverhältnisse über der Nordsee und dem Elbeästuar geprägt. Starker Wind aus westlichen Richtungen führt zu höheren Wasserständen in der Unterelbe, während starker Wind aus östlichen Richtungen zu niedrigen Wasserständen führt. Weitere Einflussfaktoren, die den Wasserstand erhöhen bzw. verringern, sind die Variation der Stärke der gezeitenerzeugenden Kräfte (Spring-/Nipp-Variation) und der Oberwasserzufluss.

Während für die Auslegung von Hochwasserschutzbauten an der Unterelbe extreme Wasserstände zu Tidehochwasser relevant sind, hängt die Entwässerung der Nebenflüsse und des Deichhinterlandes hingegen von hohen Wasserständen zu Tideniedrigwasser ab. Dies können entweder einzelne besonders hohe Tnw oder mehrere erhöhte Tnw in Serie, die Tnw-Folgen (Jensen et al. 2011) sein.

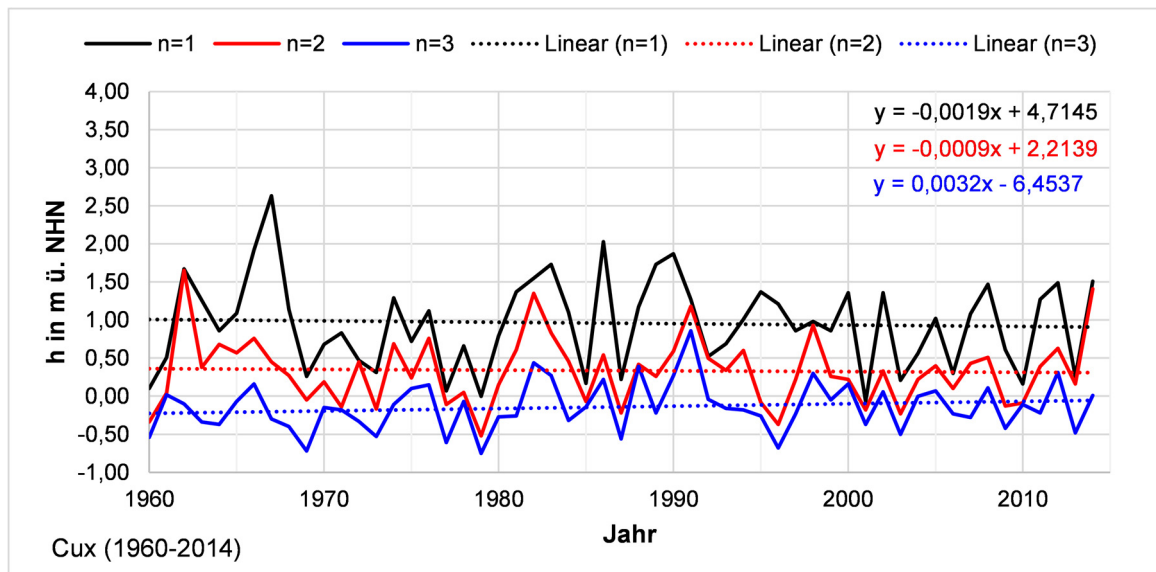
Auch der relevante Wasserstand für den Hochwasserschutz an den Nebenflüssen, d.h. auf der Binnenseite der Sperrwerke, hängt von einer Tnw-Folge ab. Nach (Jensen et al. 2011) wird eine Tnw – Folge durch eine Folgezahl  $n$  und eine Basishöhe  $h_B$  beschrieben, die sich aus der Höhe des niedrigsten Tnw in der Folge ergibt (Abbildung 25). Wie sich später noch zeigen wird (Abschnitt 4.3), kann die Basishöhe bei der Ermittlung des maßgebenden Wasserstandes für den Hochwasserschutz an den Nebenflüssen nicht als konstant angenommen werden.

Trotzdem ist die Analyse von Tnw – Folgen mit konstanten Basishöhen analog zu (Jensen et al. 2011) an diesem Punkt sinnvoll, da auf diese Weise Trends in Tnw – Folgen unterschiedlicher Folgezahlen identifiziert werden können. Dabei kann außerdem ermittelt werden, ob auch in den Tnw – Folgen ähnlich Änderungen zwischen der Mitte der 1970 er Jahre und heute zu erkennen sind.

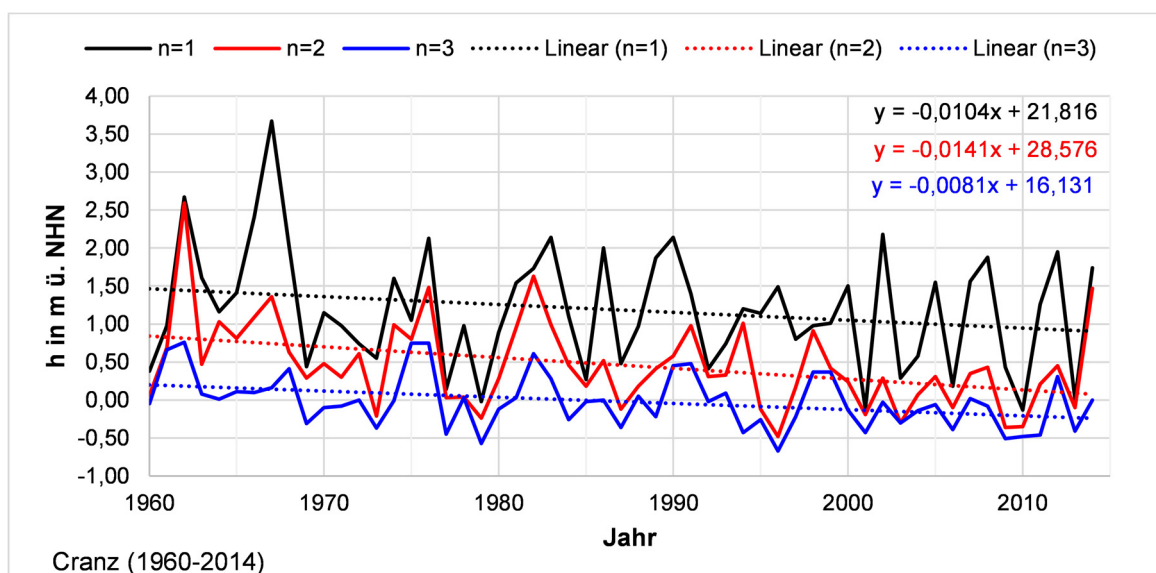


**Abbildung 25: Schematischer Tideverlauf und Abgrenzung von Tnw- Folgen (in Anlehnung an (Jensen et al. 2011))**

Im Rahmen der Untersuchungen von Tidewasserständen an der deutschen Nordseeküste haben (Jensen et al. 2011) Häufigkeitsuntersuchungen von Tnw – Folgen an Pegeln der Nordsee durchgeführt. Die Auswertungen erfolgten für Tnw- Folgen unterschiedlicher Folgezahlen. Analog zu diesem Vorgehen werden nachfolgend die Entwicklungen der Basishöhen von Tnw – Folgen ( $n = 1$  bis  $3$ ) an den Pegeln Cuxhaven und Cranz dargestellt (Abbildung 26 und Abbildung 27) und analysiert. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden Zeitreihen gleicher Länge verwendet. Die Länge wird durch die verfügbare Zeitreihe am Pegel Cranz vorgegeben, die im Jahr 1960 beginnt.



**Abbildung 26: Maximal erreichte Basishöhe durch Tnw – Folgen (n = 1 bis 3) am Pegel Cuxhaven im Zeitraum 1960-2014 (Daten: WSV)**



**Abbildung 27: Maximal erreichte Basishöhe durch Tnw – Folgen (n = 1 bis 3) am Pegel Cranz im Zeitraum 1960-2014). (Daten: WSV)**

Aus der Reihe mit der Folgezahl eins ergibt sich gleichzeitig das höchste Tnw des jeweiligen hydrologischen Jahres. Das mit Abstand höchste Tnw trat demzufolge im Jahr 1967 auf. Die Sturmflut am 23.02.1967 ist auch als zweite Niedrigwasser-Orkanflut bekannt (Jensen 2012). Der Windstau, der sich aus der Subtraktion des gemessenen Wasserstandes vom astronomischen Wasserstand ergibt, betrug 1967 am Pegel Cuxhaven zum Zeitpunkt des Tnw ca. 4,0 m und am Pegel Cranz über 4,5 m.

Die höchste Tnw – Folge mit der Folgezahl zwei wurde im Jahr 1962 bei der Sturmflut vom 16./17.02 gemessen. Der Windstau zum Zeitpunkt des Tnw betrug am Pegel Cuxhaven mindestens 3,0 m und am Pegel Cranz mindestens 3,5 m. Diese Sturmflut führte zu den höchsten bis dahin aufgezeichneten Wasserständen in der Unterelbe. Insgesamt führte sie zu verheerenden

Schäden. Die beiden hohen Tnw leisteten hierzu einen Beitrag, indem sie für langanhaltende hohe Wasserstände entlang der Elbe sorgten. Dadurch konnte Wasser in die Deckschicht der Deiche eindringen, was eine Schwächung der Widerstandsfähigkeit der Deiche zur Folge hatte. Außerdem führte das zweite hohe Tnw dazu, dass große Mengen Wasser durch die entstandenen Breschen fließen konnte. Eine ebenfalls sehr hohe Tnw – Folge mit der Folgezahl zwei trat am 06.12.2013 (hydrologisches Jahr 2014) auf. Der Windstau zum Zeitpunkt des Tnw betrug knapp 3,0 m am Pegel Cuxhaven und mehr als 3,0 m am Pegel Cranz.

Die höchste Tnw – Folge mit der Folgezahl drei trat an den Pegeln Cuxhaven und Cranz in unterschiedlichen Jahren auf. Am Pegel Cuxhaven trat die höchste Tnw – Folge mit der Folgezahl drei im Jahr 1991 auf. Der Windstau betrug bei jedem Tnw über 2 m. Am Pegel Cranz trat die höchste Folge im Jahr 1976 auf. Der Windstau betrug ebenfalls bei jedem Tnw über 2 m. Diese Tnw – Folge trat allerdings nicht im Rahmen der Sturmflut vom 03.01.1976 sondern am 20./21.01.1976 auf.

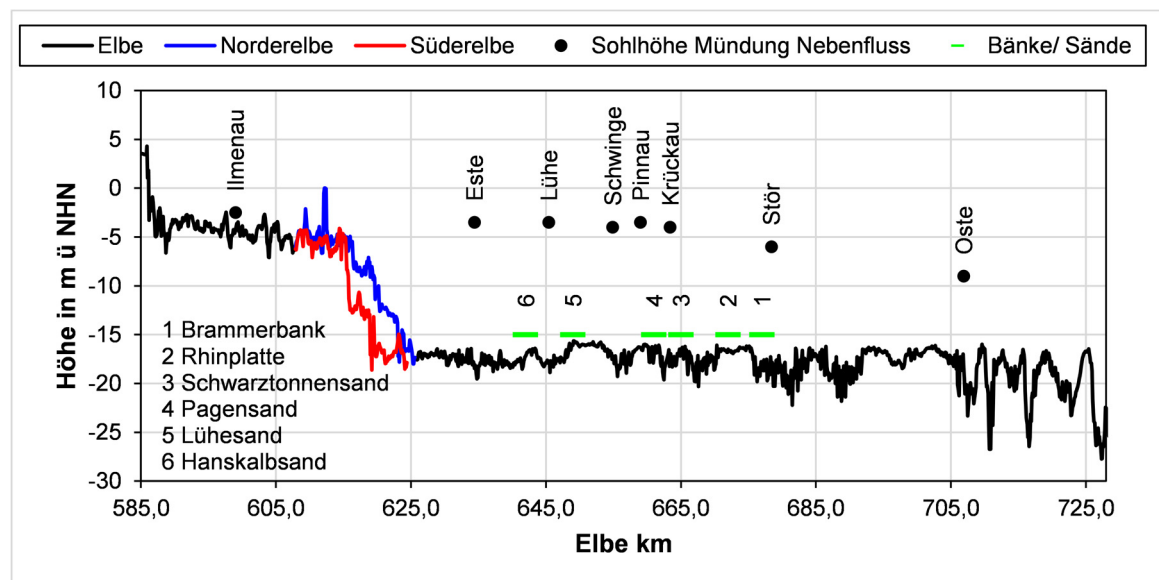
Vor dem Hintergrund der Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs, möglicher klimatischer Veränderungen und der umfangreichen flussbaulichen Maßnahmen, die Anfang der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts umgesetzt wurden, ist eine Analyse der Trends in den Tnw – Folgen erforderlich. Am Pegel Cuxhaven weisen die Tnw - Folgen mit den Folgezahlen eins und zwei im betrachteten Zeitraum mit jeweils -1,9 mm/a einen leicht negativen Trend auf. In beiden Zeitreihen treten die höchsten Werte zu Beginn auf. Die Tnw – Folge mit der Folgezahl drei weist hingegen mit 3,2 mm/a einen leicht positiven Trend auf, was vor allem auf die Häufung von hohen Werten in den 1980er und Anfang der 1990er Jahre zurückzuführen ist. Ab Mitte der 1990er sind die Werte wieder auf dem Niveau der 1960er und 1970er. (Jensen et al. 2011) führten ebenfalls Trendanalysen für den Pegel Cuxhaven durch. Dabei wurde für eine längere Zeitreihe (1937 – 2008) für Tnw – Folgen der Folgezahlen eins, zwei und drei einen schwach positiver Trend detektiert.

Am Pegel Cranz weisen im betrachteten Zeitraum alle Tnw – Folgen einen negativen Trend auf, wobei die Folgezahl eins mit -14,1 mm/a den stärksten und die Folgezahl drei mit -8,1 mm/a den schwächsten Trend aufweist. Der stark negative Trend ist u.a. auf die durchgeführten Ausbaumaßnahmen in der Unterelbe zurückzuführen, die möglicherweise von anderen Effekten, wie z.B. Veränderungen des Oberwasserzuflusses oder der Windverhältnisse, überlagert werden. Die Auswertung zeigt, dass die Tnw – Folgen, die von Pegeln im inneren des Ästuars aufgezeichnet wurden mit starken Trends behaftet sind, die sich je nach Basishöhe unterscheiden. Die Trends in den Tnw – Folgen des Pegels Cuxhaven sind deutlich geringer.

### 3.3.2 Morphologische Merkmale

Der Abschnitt der Elbe zwischen dem Wehr bei Geesthacht (km 585,9) und der Mündung in die Nordsee bei Cuxhaven (km 727,7) hat eine Länge von rund 142 km. In Abbildung 17 ist die für Ästuar typische trichterartige Form der Unterelbe zu erkennen. Im Bereich Cuxhaven (km 730) beträgt die Breite des Trichters etwa 17,5 km. Bis zur Ostemündung (km 700) verjüngt sich der Querschnitt auf rd. 5 km. Ab der Ostemündung nimmt die Verjüngung der Breite in Richtung stromauf deutlich ab. Auf den verbleibenden ca. 70 Fluss-km bis Hamburg nimmt die Breite von 5 km auf rund 0,5 km ab. Mit Ausnahme der Oste und der Ilmenau münden alle größeren tidebeeinflussten Nebenflüsse in diesen Abschnitt.

Abbildung 28 zeigt die Sohlhöhen entlang der Fahrrinne im Längsschnitt. Außerdem sind die Einmündungen der Nebenflüsse gekennzeichnet, wobei die Lage des Markierungssymbols auf der Ordinate die tiefste Sohlhöhe im Mündungsbereich des Nebenflusses angibt. Beim Vergleich wird deutlich, dass die Elbe im Bereich der Fahrrinne deutlich tiefer ist als die Nebenflüsse. Davon ausgenommen ist die Ilmenau, die stromauf von Hamburg in die Elbe mündet. In diesem Abschnitt liegt die Sohlhöhe der Fahrrinne der Elbe bei rd. -4,0 m ü. NHN. Bis zur Aufspaltung in die Norder- und die Süderelbe nimmt die Sohlhöhe auf rd. -5,0 m ü. NHN ab. In beiden Elbarmen nimmt die Sohlhöhe sprunghaft ab auf etwa -17,0 m ü. NHN. Stromab der Vereinigung von Norder- und Süderelbe variiert die Sohlhöhe zwischen etwa -16,0 m ü. NHN und -20,0 m ü. NHN. In diesen Abschnitt münden mit der Este, der Aue/Lühe, der Schwinge, der Pinnau, der Krückau und der Stör viele der größeren Nebenflüsse. Innerhalb dieses Abschnittes befinden sich einige lokale Hochpunkte, die sich meist im Bereich von Sänden und Sohlenbänken befinden. Die Pinnau und die Krückau münden im Bereich eines lokalen Hochpunktes, der Pagensander Nebenelbe. Im Bereich der Ostemündung beträgt die Tiefe der Elbe im Bereich der Fahrrinne rund -23,0 m ü. NHN. Stromab der Ostemündung treten weitere lokale Tiefpunkte mit über -25,0 m ü. NHN auf.



**Abbildung 28: Sohlhöhen entlang der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe (Topographie 2010) im Längsschnitt (Daten: WSA Hamburg)**

Die morphologischen Merkmale der Tideelbe wurden bereits vielfach beschrieben, u.a. in (Rohde 1971; Dammschneider 1983; Boehlich und Strotmann 2008; WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority 2012b; Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2014). Einige ausgewählte morphologische Merkmale der Unterelbe sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Für sechs charakteristische Abschnitte der Tideelbe werden dort Informationen zur Breite, zur Tiefe und zum Sohlmaterial gegeben. Außerdem sind für jeden Abschnitt die Nebenelben sowie die einmündenden Nebenflüsse angegeben. Da das Sohlmaterial über den Querschnitt oft stark variiert, sind für jeden Abschnitt getrennte Angaben für Fahrrinne und Seitenbereiche/Hafenbereiche angegeben. Im Bereich der Fahrrinne herrscht im Wesentlichen Sand vor, während in den Seitenbereichen überwiegend feinkörnigere Sedimente (Ton oder Schluff) vorkommen. Sind in Tabelle 5 unterschiedliche Sohlmaterialien aufgelistet, entspricht die Reihenfolge der Häufigkeit des Vorkommens, d.h. das als erstes aufgezählte Material kommt in dem betrachteten Abschnitt am häufigsten vor.

**Tabelle 5: Morphologische Merkmale der Unterelbe, unterteilt in Untersuchungsabschnitte in Anlehnung an (WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority 2012a), ergänzt nach (Boehlich und Strotmann 2008) und (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2014)**

Übergeordneter Abschnitt	Abschnitt	km	Morphologische Parameter			Nebenelben	NF mit Tideeinfluss
			Breite Hauptelbe	Tiefe bei MThw	Sohlmaterial nach (WSV 2014)		
-	-	km	m	m	-	-	-
Obere Tideelbe	Wehr Geesth. – Bunthäuser Spitze	586 - 610	300 - 500 beim Hohendeicher See: 670	~ 7,5	Fahrrinne + Seiten: enggestufte Sande Sand-Schluff-Gem., Sand-Ton-Gemisch, Ton, Schluff	-	Ilmenau
Hamburger Stromspaltungsgebiet	Bunthäuser Spitze - Nienstedten	610 - 632	Norderelbe: 200 - 400 Süderelbe: 200 - 300 ab km 626: 500-600m	~ 7,5 - 20	Fahrrinne: enggestufte Sande Hafenbecken: Ton, Schluff, Sand-Schluff-Gem., Sand-Ton-Gem.	-	-
Mittlere Tideelbe	Nienstedten - Lühesand	632 - 650	600 – 900  beim Mühlenberger Loch: 2600	~ 20	Fahrrinne: enggestufte Sande Bei Hahnöfer- und Lühes.: Ton, Schluff, Sand-Schluff-Gem., Sand-Ton-Gem. Seitenbereiche: Ton, Schluff, Sand-Schluff-Gem., Sand-Ton-Gem.	Hahnöfer Nebenelbe, Lühesander Süderelbe, Hetlinger Binnenelbe	Lühe, Este
Mittlere Tideelbe	Lühesand - Störmündung	650 - 677	1000 – 1500  bei der Pagensander Nebenelbe: ca. 2200 ab km 670: 1600-1800	~ 20	Fahrrinne: enggestufte Sande, Sand-Schluff- Gemisch, Sand-Ton Gem. Seitenbereiche: Ton, Schluff, enggestufte Sande, Sand-Schluff-Gem., Sand-Ton-Gem.	Haseld. Binnenelbe, Bützfl. Süderelbe, Pagens. Nebenelbe, Wischh. Süderelbe, Glückst. Nebenelbe	Schwinge, Pinnau, Krückau
Mittlere Tideelbe	Störmündung - Ostemündung	677 - 704	1800 – 2900 bei der Brammer Bank: 2400 -3700 beim Neufelder Watt: bis zu 5700	~ 20	Fahrrinne: enggestufte Sande Bei Brunsbüttel: Ton, Schluff, Sand-Schluff- Gemisch, Sand-Ton-Gemisch Seitenbereiche: Ton, Schluff, Sand-Schluff-Gem., Sand-Ton-Gem.	Wischh. Fahrw., Freiburger Hafenpriel	Stör
Untere Tideelbe	Ostemündung - Cuxhaven	704 - 727	Ästuar- Trichter: 5700 - 17500	~ 20 - 25	Fahrrinne: enggestufte Sande Seitenbereiche: Sand-Schluff-Gem., Sand-Ton-Gemisch, Ton, Schluff, Sand	Neufelder Rinne	Oste

### 3.3.3 Dynamik des Schwebstofftransportes

Durch Strömungen wird im Allgemeinen ein Feststofftransport hervorgerufen, der entweder rollend, springend oder in Suspension erfolgt. Die beiden ersten Varianten werden auch als *bedload* bezeichnet, das suspendierte Material (suspended particulate matter, kurz SPM) als *suspended load* (Zanke 1982). Ein Feststofftransport führt in der Regel zu morphologischen Änderungen.

In der Unterelbe werden Sedimente mit vergleichsweise großen Korndurchmessern wie Sande und Kiese fast ausschließlich als *bedload* transportiert. Dabei ist die Dynamik der Sandtransportprozesse im Mündungsbereich deutlich größer als im inneren Ästuar (Kappenberg und Fanger 2007). Feinere Sedimente werden als *suspended load* (Schwebstoff) transportiert. Der Schwebstofftransport kohäsiver Sedimente macht in der Unterelbe den wesentlichen Teil des Feststofftransportes aus (Weilbeer 2003). Demzufolge erfolgt auch Feststoffaustausch zwischen der Unterelbe und ihren Nebenflüssen im Wesentlichen in Form von Schwebstoffen. Entsprechend richtet sich der Fokus im Folgenden auf den Schwebstofftransport kohäsiver Sedimente. Die Schwebstoffe in der Unterelbe und der Deutschen Bucht weisen Korngrößen  $< 63 \mu\text{m}$  auf und bestehen überwiegend aus Flocken, in die mineralische und organische Anteile eingelagert sind (Kappenberg und Fanger 2007). Die elektro-chemischen Kräfte, die an der Oberfläche der Einzelpartikel wirken, übersteigen die Gravitationskraft um ein Vielfaches. Dementsprechend werden die Eigenschaften der Partikel maßgeblich durch die Oberflächenkräfte beeinflusst (Hayter und Mehta 1986), woraus sich die Bezeichnung *kohäsiv* ergibt.

#### 3.3.3.1 Maßgebende Prozesse

Beim Transport kohäsiver Sedimente spielen folgende Prozesse eine Rolle: Advektion, Diffusion, Dispersion, Absinken, Deposition, Konsolidierung und Erosion. Die aufgezählten Prozesse werden vor allem durch die Hydrodynamik, die chemische Zusammensetzung des Wassers (Salzgehalt, pH-Wert) und die Eigenschaften der Flocken (u.a. Sinkverhalten und Erosionswiderstand) bestimmt. Die Beschreibung von Strömungsgrößen erfolgte bereits in Abschnitt 3.3.1, wobei insbesondere die Asymmetrien in der Tidekurve beschrieben wurden. Bevor diese Asymmetrien bei der Beschreibung des horizontalen Transports von Schwebstoffen wieder aufgegriffen werden, sollen zunächst die dominierenden Prozesse in der Vertikalen kurz beschrieben werden. Detaillierte Ausführungen hierzu sind u.a. zu finden in (Dronkers und van Leussen 1988; Dyer 1989; Winterwerp 1999).

#### Absinken

Das Sinkverhalten der kohäsiven Schwebstoffe in der Wassersäule wird im Wesentlichen durch die Sinkgeschwindigkeit  $w_s$  bestimmt. Diese hängt maßgeblich von der Größe sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Schwebstoffteilchens ab. Nach (Rijn, Leo C. van 1993) gewinnen bei Konzentrationen größer als 1000 mg/l zusätzliche Prozesse wie behindertes Absinken (Richardson und Zaki 1954) an Relevanz. Da die Konzentrationen in der Unterelbe in der Regel unterhalb dieses Grenzwertes liegen, wird dieser Effekt vernachlässigt. Während Teilchen in Wasser mit geringem Salzgehalt ( $< 1 \text{ ppt}$ ) meist in Form von Einzelpartikeln vorkommen, ermöglicht ein leichter Anstieg des Salzgehaltes auf 2-3 ppt die Aggregation zu Flocken, die aus tausenden Einzelpartikeln bestehen können (Krone 1978). Die Flockenbildung wird durch

Kollisionen und anschließendes Aneinanderhaften von einzelnen Teilchen hervorgerufen. Kollisionen entstehen u.a. aufgrund unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeiten (differential settling) und aufgrund von Turbulenzen, die als Hauptverursacher der Kollisionen angesehen werden. Bis zu einem gewissen Maß an Turbulenz begünstigt diese die Flockenbildung. Zu hohe Schubspannungen als Folge höherer Turbulenz begünstigen demgegenüber den Zerfall der Flocken. Mit der Größe der Flocken nimmt in der Regel auch die Sinkgeschwindigkeit zu.

### **Deposition und Konsolidierung**

Basierend auf der Annahme, dass kohäsive Sedimente nur in Form von Flocken deponieren, führte (Krone 1978) die sogenannte kritische Depositionsspannung  $\tau_{c,dep}$  ein. Wird diese Spannung unterschritten, kommt es zur Flockenbildung und zum beschleunigten Absinken. Bei Überschreitung zerfallen die Flocken und die Sinkgeschwindigkeit nimmt ab (Dronkers und van Leussen 1988). Erreichen die Flocken die Sohlfläche, entsteht dort eine Schicht aus hochkonzentrierten Schwebstoffen, die sich im Wesentlichen in vertikaler Richtung (Konsolidierung) und nur noch geringfügig in horizontaler Richtung bewegt. (Hayter und Mehta 1986) bezeichnen diese Schicht dementsprechend als stationäre Suspension. Nach (Dronkers und van Leussen 1988) beträgt die Schichtdicke nur wenige Zentimeter. Mit voranschreitender Konsolidierung geht das Material aus der stationären Suspension in eine teilkonsolidierte Schicht und schließlich in eine konsolidierte Schicht über (Hayter und Mehta 1986).

### **Erosion**

Die sedimentierten Schwebstoffe werden wieder in die Wassersäule zurückgeführt, wenn deren kritische Erosionsschubspannung  $\tau_{c,ero}$  überschritten wird. Im Unterschied zu nicht-kohäsiven Partikeln bewirken neben dem Eigengewicht auch die Kohäsionskräfte zwischen den Partikeln, dass Partikel am Boden bleiben. Dementsprechend ist auch die kritische Erosionsschubspannung eines Partikels viel höher als es aufgrund seiner Dichte und seiner Größe zu erwarten wäre. Die Rückführung von Material aus der stationären Suspension in die Wassersäule wird mit dem englischen Begriff *re-entrainment* bezeichnet. Bei entsprechend hoher Sohlschubspannung kann auch Material aus der (teil-) konsolidierten Schicht herausgelöst und in der Wassersäule suspendiert (engl.: *suspension*) werden. Die Intensität der Erosion von Material wird dabei durch einen Erodibilitätsfaktor beschrieben. Neben der Erosion einzelner Partikel kann es bei kohäsiven Böden auch zur Massenerosion durch Ablösung ganzer Elemente aus der Schicht kommen, wie von (Schröder und Zimmermann 1993) beschrieben.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden viele Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Erosionseigenschaften durchgeführt (Parchure und Mehta 1985; Winterwerp 1999; Schweim 2005). Ein Ergebnis dieser Untersuchungen sind Modelle, mit denen die Erosionsparameter u.a. als Funktion der Korngröße, des Porenwassergehalts, des organischen Anteils und/oder der Zusammensetzung der Minerale beschrieben werden. Außerdem entstanden empirische Modelle, die einen Zusammenhang zwischen Erodibilitätsfaktor und kritischer Erosionsschubspannung beschreiben. Schweim beschreibt den nicht-linearen Verlauf der kritischen Erosionsschubspannung  $\tau_{c,ero}$  und der Porosität  $n$  über die Tiefe (Schweim 2005). Demnach weist die Schicht der stationären Suspension eine besonders hohe Porosität  $n$  und eine geringe kritische Erosionsschubspannung  $\tau_{c,ero}$  auf. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Porosität  $n$  ab und die kritische Erosionsschubspannung  $\tau_{c,ero}$  zu. Die Komplexität dieser Prozesse führt dazu, dass der

Sedimenttransport unter realen Bedingungen bisher nicht exakt bestimmt werden konnte. Nachfolgend werden die ästuartypischen Besonderheiten zusammengefasst, die den Sedimenttransport maßgeblich prägen.

### **Bi-direktionale Strömungen, Erosionsbereiche, Depositionsbereiche**

In Ästuaren, wie der Unterelbe, rufen die bi-direktionalen Strömungen Schubspannungen hervor, die dazu führen, dass Partikel deponieren oder erodieren und in Richtung stromauf oder stromab transportiert werden. In strömungsberuhigten Bereichen, wie z.B. Nebenarmen, Flachwasserbereichen und Hafenbecken wird überwiegend Material deponiert. In Bereichen hoher Strömungsgeschwindigkeiten, wie z.B. der Fahrrinne, wird überwiegend Material erodiert, sofern der Erosionswiderstand des anstehenden Sohlmaterials dies zulässt. Allerdings treffen diese generellen Aussagen nicht für alle Abschnitte zu. So wird beispielsweise in einigen Abschnitten der Fahrrinne eine Tendenz zur Deposition beobachtet (Abschnitt 3.3.4). Umgekehrt wird in einigen Flachwasserbereichen und Nebenelben keine fortschreitende Auflandung festgestellt (BFG 2014).

### **Asymmetrien**

Eine besondere Charakteristik von Ästuaren, die den Sedimenttransport stark beeinflusst, sind die in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Asymmetrien im Tideverlauf von Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit. Diese führen dazu, dass ein Partikel nach einer Tideperiode seinen Ausgangsort in der Regel nicht wieder erreicht, woraus ein Netto-Transport in Richtung stromauf bzw. in Richtung stromab resultiert. Nach Dronkers entscheidet das Verhältnis der maximalen Flutströmung zur maximalen Ebbströmung über den resultierenden Netto-Transport grober Sedimente<sup>10</sup> in Suspension (Dronkers 1986). Das Verhältnis des Strömungsgradienten bei Flutstromkenterung gegenüber dem Strömungsgradienten bei Ebbstromkenterung prägt den Netto-Transport feiner Sedimente in Suspension (Dronkers 1986; Eisma 1998). Ein Netto-Transport in Richtung stromauf wird als *tidal pumping* bezeichnet. Eine ausführliche Beschreibung ist in (Scully und Friedrichs 2007) zu finden.

Eine weitere Asymmetrie, die selbst bei symmetrischen Verläufen der Strömungsgeschwindigkeit einen Stromauftransport von Schwebstoffen zur Folge hat, ist die Asymmetrie von Deposition und Erosion (*settling lag, scour lag*) (Kappenberg und Fanger 2007). Der Grund liegt in der Abnahme der Amplitude der Strömungsgeschwindigkeit zum Kopf des Ästuars hin. Da dieser Mechanismus wenig bekannt ist, wird er nachfolgend kurz erläutert.

Bei einsetzender Flut erreicht ein Wasserkörper nach kurzer Zeit eine Geschwindigkeit, die eine Schubspannung verursacht, die oberhalb der kritischen Erosionsschubspannung eines Partikels liegt. In der Folge wird dieser erodiert, mit dem Flutstrom transportiert und vor Ende des Flutstromes beim Erreichen der kritischen Depositionsschubspannung, die unterhalb der kritischen Erosionsschubspannung liegt (IKSE 2005), sedimentiert. Der Wasserkörper bewegt sich hingegen noch etwas weiter stromauf (*settling lag*). Bei einsetzendem Ebbstrom kann der gleiche Wasserkörper, der den Partikel stromauf transportiert hat, diesen Partikel nicht wieder

---

<sup>10</sup> Dronkers stuft Partikel mit einer Sinkgeschwindigkeit  $> 0,01$  m/s als grob und Partikel mit einer Sinkgeschwindigkeit  $< 0,01$  m/s als fein ein (Dronkers 1986).

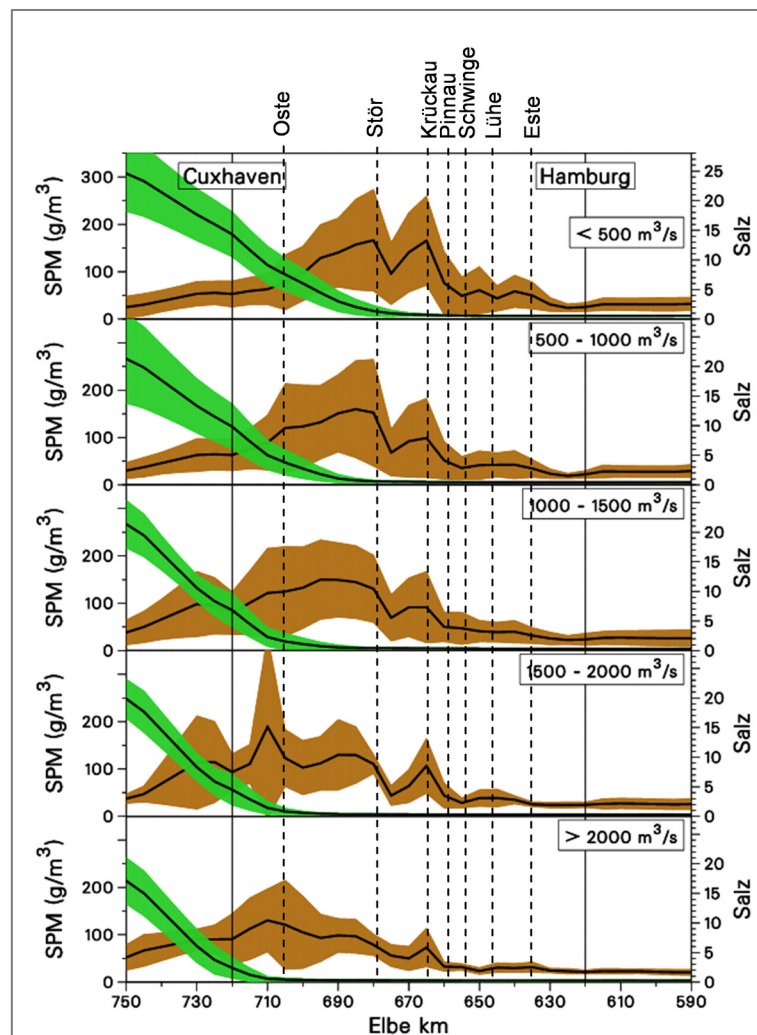
resuspendieren, da seine Fließgeschwindigkeit aufgrund der langsameren Beschleunigung nach Einsetzen der Ebbe noch nicht hoch genug ist. Stattdessen wird der Partikel von einem Wasserkörper, der weiter stromauf gestartet ist, erodiert und stromab transportiert. Bei Erreichen der kritischen Depositionsschubspannung sinkt der Partikel abermals ab (*scour lag*). Durch die kürzere Dauer der Überschreitung der kritischen Geschwindigkeit während der Ebbe wird der Partikel nicht wieder bis zum Ausgangsort transportiert, sondern stromauf davon abgelagert (van Straaten, L. M. J. U. und Kuenen, Ph. H. 1958; Dyer 1989).

### 3.3.3.1 Trübungszone

Das Vorhandensein einer Trübungszone ist charakteristisch für Ästuar. An der Entstehung der Trübungszone sind die bodennahe Dichteströmung und die Gezeiten-Geschwindigkeitsasymmetrie maßgeblich beteiligt (Burchard und Baumert 1998). Nach (Bergemann 2004) sind die Schwebstoffgehalte in der Unterelbe zwischen dem Hamburger Hafenausgang (km 628) und der Insel Scharhörn (km 745) deutlich höher als im stromauf gelegenen limnischen Bereich und im stromab gelegenen marinen Nordseebereich. Kappenberg und Fanger geben den Abschnitt zwischen Hamburg (km 620) und Brunsbüttel (km 695) als Bereich mit erhöhten Schwebstoffgehalten an (Kappenberg und Fanger 2007). Außerdem geben sie an, dass die Trübungszone typischerweise zwei Hauptmaxima aufweist, die überwiegend zwischen km 670 und km 690 auftreten (Kappenberg und Fanger 2007).

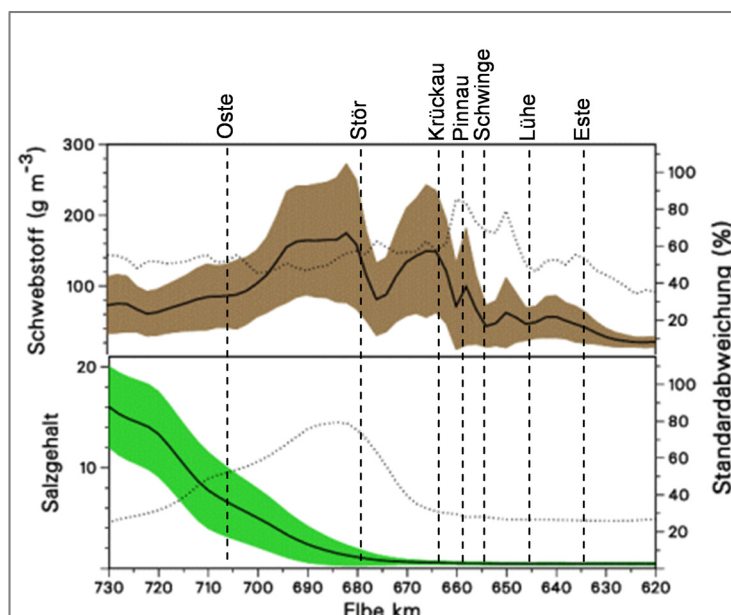
Die Lage der Trübungszone und der Hauptmaxima wird vom Oberwasserzufluss beeinflusst (Bergemann 2004; Kappenberg und Fanger 2007; BFG 2014). In Phasen mit geringem Oberwasserzufluss wächst das Schwebstoffinventar deutlich an. Bergemann schätzt die mittlere Schwebstoffmenge in der Trübungszone bei niedrigem Oberwasserzufluss ( $Q < 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) auf rd. 550.000 t und bei mittlerem Oberwasserzufluss ( $500 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 900 \text{ m}^3/\text{s}$ ) auf rd. 360.000 t bis 470.000 t (Bergemann 2004). Bei hohem Oberwasserzufluss sinkt die Konzentration innerhalb weniger Tiden deutlich ab, was als seewärtige Verlagerung der Trübungs- und Brackwasserzone bezeichnet wird (Bergemann 2004; Kappenberg und Fanger 2007). Bergemann schätzt die Schwebstoffmenge, die von einem Frühjahrshochwasser in die Nordsee ausgetragen wird, auf rd. 200.000 t (Bergemann 2004). Schätzungen der ein- und ausgetragenen Mengen an Feinmaterial in die Unterelbe bei mittleren und niedrigen Oberwasserzuflüssen existieren bislang nicht (BFG 2014).

In Abbildung 29 wird die seewärtige Verlagerung des seeseitigen Maximums der Trübungszone bei steigendem Oberwasserzufluss deutlich. Das zweite Maximum bei km 670 bleibt allerdings lagestabil und nimmt lediglich in seiner Stärke ab. Aus dieser Beobachtung schließen Kappenberg und Fanger, dass die Existenz der beiden Maxima auf unterschiedliche Prozesse zurückzuführen ist (Kappenberg und Fanger 2007).



**Abbildung 29: Verteilung von Schwebstoff- und Salzgehalt in Abhängigkeit vom Oberwasser (Daten: Hubschrauberlängsprofile ARGE ELBE) (aus (Kappenberg und Fanger 2007), verändert)**

Abbildung 30 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichungen des Schwebstoff- und Salzgehaltes in der Elbe. Diese wurden auf der Grundlage von Längsprofilmessungen aus dem Zeitraum 1979 - 2005 ermittelt. Auch in den Mittelwerten des Schwebstoffgehalts sind die beiden identifizierten Maxima bei km 670 und km 690 deutlich zu erkennen. Gleichzeitig ist im Bereich um die Maxima (km 655 - km 695) die Variation des Schwebstoffgehalts am größten. In diesen Abschnitt münden die Stör, die Krückau und die Pinnau. In dem stromauf gelegenen Abschnitt, in dem die Schwinge, Lühe und Este münden, ist die absolute Standardabweichung hingegen deutlich geringer.



**Abbildung 30: Statistik von Schwebstoff- und Salzgehalt im Längsschnitt der Tide-Elbe: Mittelwerte von 1979 bis 2005 (durchgezogene schwarze Linien), Variationsbereich von einer Standardabweichung (farbige Flächen) und prozentuale Variation (punktierte Linien, rechte Achse). (Daten: Hubschrauberlängsprofile ARGE ELBE) (aus Kappenberg und Fanger 2007, verändert)**

Durch die BAW wurden an einzelnen Profilen der Unterelbe ADCP-Messungen über den Zeitraum von einer Tide durchgeführt (BAW 2011a). Außerdem wurden regelmäßig Schwebstoffproben genommen, um über das reflektierte ADCP-Signal auf die Schwebstoffkonzentration schließen zu können. Die Messungen wurden in mehreren Jahren an den gleichen Positionen wiederholt. Die Auswertungen ergaben für ein Profil im Bereich des Trübungsmaximums bei km 680 Schwebstofffrachten zwischen 45.000 t und 72.000 t je Halbtide. Weiter stromauf bei km 630 wurde eine Schwebstofffracht zwischen 10.000 t und 20.000 t je Halbtide ermittelt. Aufgrund der Anzahl der zugrunde liegenden Daten und der Unsicherheiten, mit denen die Messwerte behaftet sind, dienen die angegebenen Werte lediglich als Hinweis auf die Größenordnung der Schwebstofffrachten.

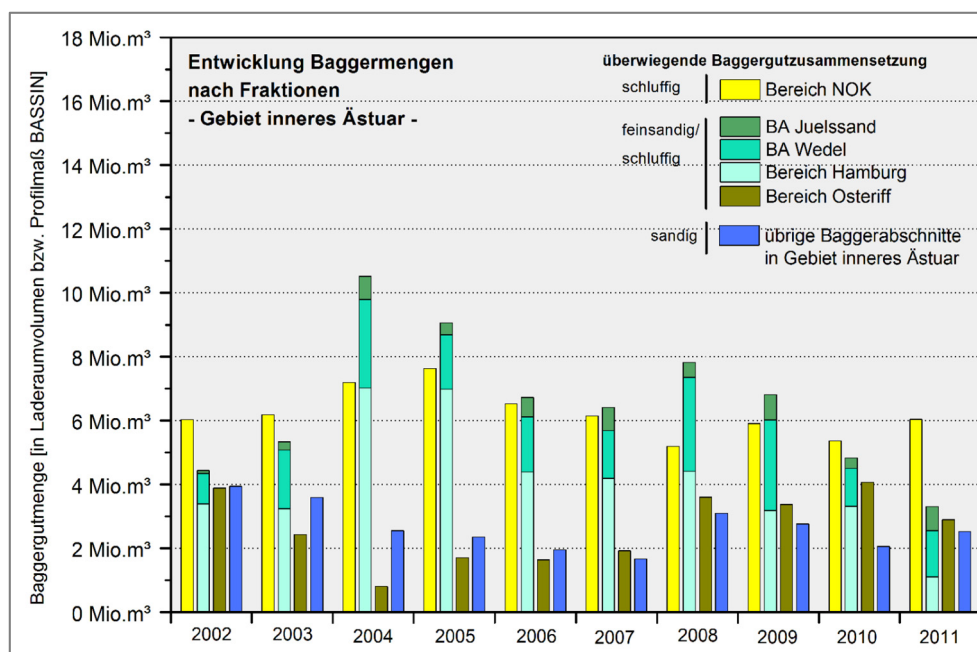
### 3.3.4 Morphologische Änderungen und Sedimentmanagement

Aus der Dynamik des Schwebstofftransportes in der Unterelbe resultieren fortwährende morphologische Veränderungen. Tendenzielle Verlandungszonen in der Unterelbe sind strömungsberuhigte Bereiche wie Nebenarme, Flachwasserbereiche und Hafenbecken. Es treten allerdings auch abschnittsweise Verlandungen im Bereich der Fahrrinne auf, wie z.B. in den Abschnitten Osterriff, NOK, Wedel, Juellssand und im Bereich der Hamburger Delegationsstrecke (BFG 2014). Folglich stellen diese Abschnitte Baggerschwerpunkte für Sedimente dar. Abbildung 31 zeigt die Entwicklung der Baggermengen an den Baggerschwerpunkten in der Unterelbe für die Jahre 2002 bis 2011 unterteilt nach Korngrößen. Eine ausführliche Beschreibung der Baggermengen ist in (BFG 2014) zu finden.

Das gebaggerte Feinmaterial stammt im Wesentlichen aus den Abschnitten Osterriff (nahe der Ostemündung bei km 706,9), NOK Vorhafenbereich (km 698), Wedel/Juellssand (nahe den Mündungen von Schwinge (km 654,9), Lühe (km 645,4) und Este (km 634,4)) und dem

Hamburger Hafen. Außerdem wird an mehreren Stellen im Ästuar sandiges Material gebaggert. Die Lage der beiden Baggerschwerpunkte Osteriff und NOK korrespondieren in etwa mit der Lage der beiden Maxima der Trübungszone der Elbe (vgl. Abschnitt 3.3.3.1). Die weiteren Baggerschwerpunkte von Feinmaterial liegen weiter stromauf in Bereichen geringerer Schwebstoffkonzentration.

In Abbildung 31 ist zu erkennen, dass die Baggermengen von Feinmaterial in den Jahren 2004 und 2005 vor allem im Bereich Hamburg deutlich angestiegen sind. Hierfür wurden „stark intensivierte Sedimentkreisläufe und daraus resultierende Mehrfachbaggerungen derselben Sedimente als eine Hauptursache identifiziert“ (BFG 2014). In den Folgejahren wurde die Strategie kurzer Transportwege von Baggergut bis zur Verklappungsstelle, die nach der Fahrrinnenanpassung 1999/2000 verfolgt wurde, geändert. Außerdem wurden einige weitere Maßnahmen umgesetzt, die in (BFG 2014) näher beschrieben werden. Ab 2006 lagen die Baggermengen wieder auf dem Niveau von 2002 und 2003.



**Abbildung 31: Korngrößen-spezifische Baggermengenentwicklung 2002 bis 2011 für die Unterelbe (Gebiet inneres Ästuar) inklusive der Bereiche Hamburg und NOK (Daten: WSV, HPA) (aus BFG 2014)**

### 3.4 Zusammenfassung

Die Unterelbe steht in ständiger Wechselwirkung mit ihren Nebenflüssen. Dabei ist der Einfluss, der von der Unterelbe auf die Nebenflüsse ausgeübt wird, deutlich größer als im umkehrten Fall. Dennoch spielen die Nebenflüsse eine wichtige Rolle im Ästuarsystem.

Die Unterläufe der Nebenflüsse werden maßgeblich von der Tide- und Sedimentdynamik in der Unterelbe geprägt. Mit der Tide werden Wasser und Sedimente in die Unterläufe eingetragen, zwischengespeichert und wieder ausgetragen. Dadurch werden die Tideverläufe von Wasserstand,

Fließgeschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentration in der Elbe insgesamt gedämpft, was wiederum auch Einfluss auf die Sedimentdynamik in der Elbe hat.

Da die Tide- und Sedimentdynamik im Verlauf des Ästuars zum Teil stark variieren, unterscheiden sich die Rahmenbedingungen für jeden Nebenfluss in Abhängigkeit von der Lage der Einmündung des jeweiligen Nebenflusses in die Unterelbe. Aus diesem Grund ist eine losgelöste Betrachtung von Fragestellungen an den Nebenflüssen ohne vorausgehende Betrachtung und Analyse der Rahmenbedingungen in der Unterelbe nicht sinnvoll.

Das Einzugsgebiet der Unterelbe, das zu 75% von den Nebenflüssen entwässert wird, stellt einen bedeutenden Lebens- und Wirtschaftsraum dar, in dem rund 3,8 Millionen Menschen leben. Knapp die Hälfte dieser Bevölkerung wohnt in Hamburg, ein weiterer großer Anteil wohnt in mehreren Mittelzentren, die über das Einzugsgebiet verteilt sind. In der Vergangenheit wurden zur Sicherung und zum Ausbau des Siedlungs- und des landwirtschaftlich genutzten Raumes sowie zur Verbesserung der Schiffbarkeit einschneidende Veränderungen an der Unterelbe, den Nebenflüssen und im Einzugsgebiet vorgenommen.

In der Unterelbe werden die hydro- und morphodynamischen Prozesse durch die Gezeiten und den Oberwasserzufluss aus dem Einzugsgebiet geprägt, die sich innerhalb des Ästuars überlagern. Die Gezeitenwelle wird zudem beim Durchlaufen des Ästuars durch die Geometrie, zu der auch die Geometrie der Nebenflüsse zählt, und die Bodenreibung verformt. Die Verformung zeigt sich in einer asymmetrischen Verformung der Wasserstands- und der Fließgeschwindigkeitsganglinie und wird im Abschnitt zwischen der Störmündung und der Estemündung besonders deutlich. In diesem 40 km langen Abschnitt, in den die meisten tidebeeinflussten Nebenflüsse münden, steigt das MThw von 1,6 m ü. NHN um rund 0,4 m auf 2,0 m ü. NHN an. Das MTnw fällt in diesem Abschnitt von -1,2 m ü. NHN bei der Störmündung auf knapp -1,5 m ü. NHN bei der Estemündung ab. Insgesamt nimmt der Tidehub um rund 0,7 m zu. Diese Veränderung des Tidehubs wird auch im Tideverlauf der Fließgeschwindigkeit deutlich.

Die Gegenüberstellung der mittleren Tidekennwerte für den aktuellen Zustand der Unterelbe mit den mittleren Tidekennwerten des Zustandes vor rund 40 Jahren zeigt, dass es vor allen im Hamburger Raum zu massiven Änderungen gekommen ist. Der Tidehub bei Hamburg hat um rund 0,85 m und im Bereich der Störmündung um rund 0,15 m zugenommen. Mit der Änderung des Tidehubes ging eine Veränderung der Strömungsgeschwindigkeiten einher, die wiederum Auswirkungen auf die Schwebstoffdynamik hat. Die Veränderungen der Tidekennwerte resultieren hauptsächlich aus den flussbaulichen Veränderungen, die an der Unterelbe vorgenommen wurden.

In der Unterelbe erfahren die Fließgeschwindigkeiten im Tideverlauf eine weitere Verformung, die auf die Vermischung von Süß- und Salzwasser zurückzuführen ist. In jenem Abschnitt, in dem die Vermischung stattfindet, führen verschiedene Mechanismen zur Ausbildung einer im Tidenmittel stromaufgerichteten Restströmung. Obwohl die Größenordnung der Restströmung im Vergleich zu den absoluten Strömungen deutlich geringer ist, sind die hervorrufenden Mechanismen maßgeblich an der Ausbildung der Trübungszone in der Elbe beteiligt. Die Unterelbe weist in dem Bereich mit geringen Salzgehalten am flussseitigen Ende der Brackwasserzone, etwa bei km 695 und dem anschließenden Süßwasserbereich bis km 620, eine Zone erhöhter Schwebstoffkonzentrationen auf. Diese Trübungszone weist typischerweise zwei Hauptmaxima auf, die in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss überwiegend zwischen km 670

und 690 auftreten. In diesen Bereich bzw. in unmittelbarer Nähe dieses Bereiches münden die Stör (km 678,4), die Oste (km 706,9) und die Krückau (km 663,4). Dementsprechend ist die mittlere Schwebstoffkonzentration in der Elbe im Bereich der Mündung dieser Flüsse am höchsten.

Tabelle 6 zeigt abschließend eine Zusammenfassung ausgewählter hydrologischer und morphologischer Kenngrößen der Unterelbe im Bereich der Einmündungen der tidebeeinflussten Nebenflüsse. Hinsichtlich der Schwebstoffkonzentration sei bereits an dieser Stelle angemerkt, dass der angegebene Wert für die mittlere Schwebstoffkonzentration im Gegensatz zum MThw, MTnw und zum mittleren Salzgehalt nicht zwangsläufig repräsentativ für den Mündungsbereich der Nebenflüsse ist (vgl. Abschnitt 4.4.1).

**Tabelle 6: Zusammenfassung ausgewählter morphologischer und hydrologischer Rahmenbedingungen in der Unterelbe auf Höhe der Einmündungen der tidebeeinflussten Nebenflüsse**

<b>Name</b>	<b>Mün- dung</b>	<b>Sohlhöhe in der Fahrrinne der Elbe</b>	<b>Breite der Elbe</b>	<b>MThw</b>	<b>MTnw</b>	<b>Mitt- lerer Salz- gehalt</b>	<b>Mittlere Schweb- stoff- konzent- ration</b>
	<b>Elbe km</b>	<b>m ü. NHN</b>	<b>m</b>	<b>m ü. NHN</b>	<b>m ü. NHN</b>	<b>PSU</b>	<b>mg/l</b>
Oste	706,9	-20 bis -23	ca. 5000	ca. 1,5	ca. -1,3	7	130
Stör	678,4	-17 bis -20	ca. 2600	ca. 1,6	ca. -1,25	< 2	160
Krückau	663,4	ca. -17	ca. 2200	ca. 1,67	ca. -1,24	< 1	150
Pinnau	659,0	-16 bis -17	ca. 1800	ca. 1,7	ca. -1,25	< 1	80
Schwinge	654,9	-17 bis -18	ca. 1500	ca. 1,73	ca. -1,26	< 1	60
Aue/Lühe	645,4	ca. -18	ca. 1400	ca. 1,84	ca. -1,3	< 1	50
Este	634,4	-17 bis -19	ca. 1000	ca. 2,0	ca. -1,4	< 1	50
Ilmenau	599,0	-4	ca. 300	ca. 2,5	ca. -0,25	< 1	20

## 4. Nebenflüsse der Unterelbe

Die zwölf größten Nebenflüsse der Elbe entwässern ein Einzugsgebiet von 9.826 km<sup>2</sup>, was in etwa 75% des Einzugsgebietes der Unterelbe entspricht (Abbildung 32). Auf niedersächsischer Seite entwässern Ilmenau, Seeve, Este, Lühe, Schwinge, Oste und Medem ein Einzugsgebiet von 6.314 km<sup>2</sup>. Auf schleswig-holsteinischer Seite entwässern Bille, Alster, Pinnau, Krückau und Stör ein Einzugsgebiet von 3.512 km<sup>2</sup>. Acht der zwölf Nebenflüsse unterliegen heute noch dem Tideeinfluss der Nordsee, der über die Elbe einschwingt. Ab Wasserständen von rund 0,5 m über MThw wird der Tideeinfluss auch an diesen Nebenflüssen durch Schließung der Mündungssperrwerke unterbunden. Die übrigen vier Nebenflüsse sind durch Bauwerke dauerhaft vom Flutstrom in der Elbe entkoppelt und entwässern im Siel- oder Schöpfwerksbetrieb.

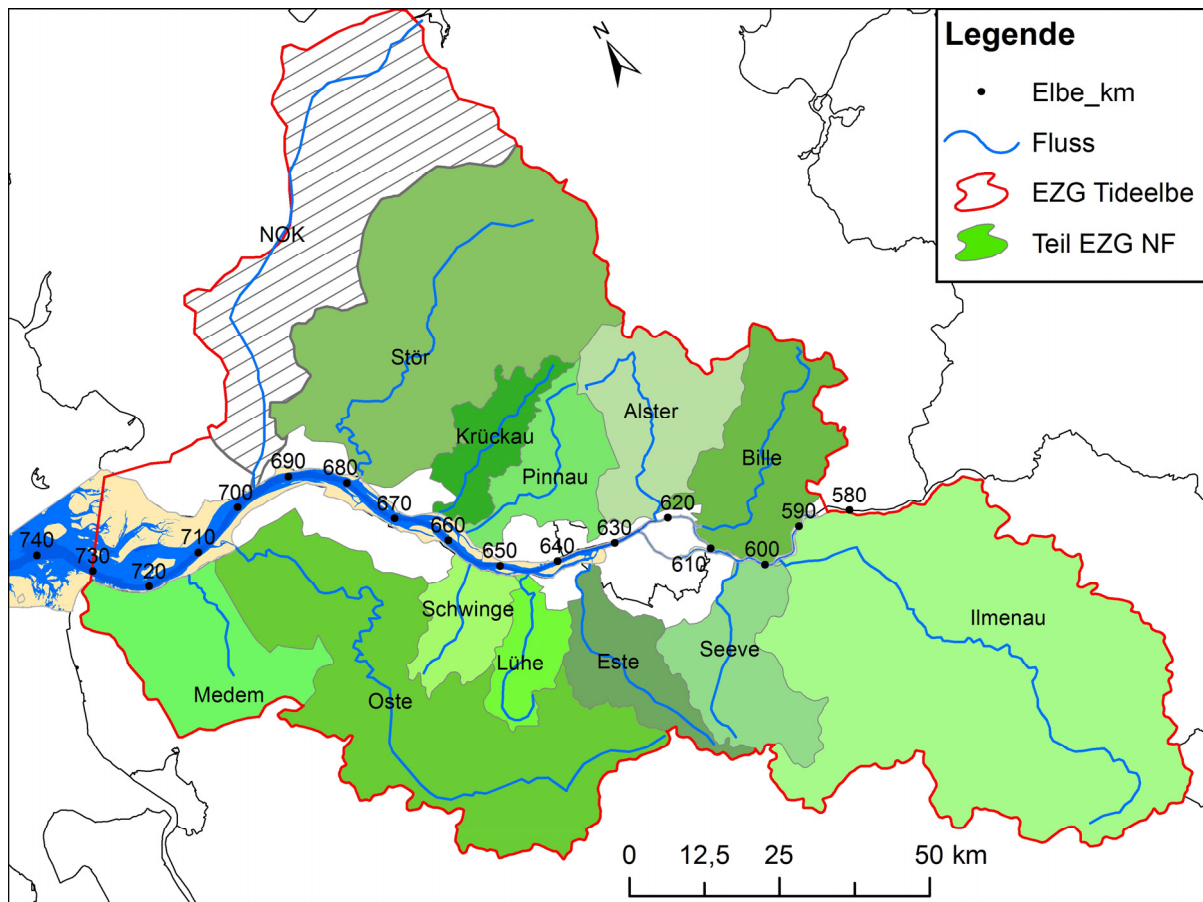


Abbildung 32: Hydrographische Karte des Einzugsgebietes der Unterelbe

Tabelle 7 fasst die hydrologischen Grunddaten der betrachteten Nebenflüsse der Unterelbe zusammen. Von allen Nebenflüssen besitzt die Ilmenau das größte Einzugsgebiet mit einer Fläche  $A_E = 2.852 \text{ km}^2$ , gefolgt von der Stör ( $A_E = 1.781 \text{ km}^2$ ) und der Oste ( $A_E = 1.711 \text{ km}^2$ ). Alle weiteren Nebenflüsse verfügen über deutlich kleinere Einzugsgebiete in der Größenordnung von 200 bis 400 km<sup>2</sup>. Der längste Nebenfluss ist die Oste mit einer Gesamtlänge von  $l_{Ges} = 153 \text{ km}$ . Gleichzeitig verfügt die Oste auch über den längsten tidebeeinflussten Abschnitt mit  $l_T = 74,6 \text{ km}$ . Der Tideeinfluss der Oste wird durch das Stauwehr bei Bremervörde begrenzt. Der zweitlängste Nebenfluss ist die Ilmenau ( $l_{Ges} = 107 \text{ km}$ ), die allerdings bedingt durch die Schleuse Fahrenholz nur einen sehr kurzen tidebeeinflussten Abschnitt ( $l_T = 11,0 \text{ km}$ ) besitzt. Der drittlängste Nebenfluss ist die Stör ( $l_{Ges} = 87 \text{ km}$ ), die mit 50,2 km über den zweitlängsten tidebeeinflussten Abschnitt verfügt. Alle weiteren tidebeeinflussten Nebenflüsse haben eine deutlich geringere Gesamtlänge in der Größenordnung von 40 km, von denen zwischen fünf und

20 km tidebeeinflusst sind. Die Gesamtlänge der tidebeeinflussten Abschnitte der betrachteten Nebenflüsse beträgt rd. 196 km.

**Tabelle 7: Hydrologische Grunddaten der Nebenflüsse der Tideelbe (in Anlehnung an IKSE 2005, ergänzt nach (Bergemann und Böhme 2011))**

Name	Mündung bei km	Seite	Sielbetrieb	Größe EZG $A_E$ in km <sup>2</sup>	Gesamtlänge $l_{Ges}$ in km	Länge tidebeeinfl. Abschnitt <sup>11</sup> $l_T$ in km	Feste Tidegrenze
Medem	712,5	L	J	483	16	-	-
Oste	706,9	L	N	1.711	153	74,6	Stauwehr Bremervörde
Stör	678,4	R	N	1.781	87	50,2	-
Krückau	663,4	R	N	276	40	11,3	-
Pinnau	659,0	R	N	368	40	18,8	-
Schwinge	654,9	L	N	216	35	4,6	Salztorschleuse Stade
Aue/Lühe	645,4	L	N	217	39	12,7	-
Este	634,4	L	N	364	45	12,5	Marschtorwehr Buxtehude
Alster	622,2	R	J	581	56	-	-
Bille	615,1	R	J	506	18	-	-
Seeve	604,9	L	J	471	49	-	-
Ilmenau	599,0	L	N	2.852	107	11,0	Schleuse Fahrenholz
Alle			$\Sigma$	9.826	685		
Nur tidebeeinflusst			$\Sigma$	7.785	546	195,7	

Von den acht Flüssen mit direktem Tideeinfluss besitzen vier eine permanente künstliche Tidegrenze in Form eines Bauwerks. Die anderen vier haben eine natürliche Tidegrenze, die in Abhängigkeit von der Höhe der auflaufenden Tide variiert. Die Tidegrenze unterteilt die Nebenflüsse in einen nicht-tidebeeinflussten Oberlauf und einen tidebeeinflussten Unterlauf. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den tidebeeinflussten Unterläufen der Nebenflüsse.

Die hydrographische Ausgangssituation ist an allen Nebenflüssen, die einen tidebeeinflussten Unterlauf haben, ähnlich. Daher ist davon auszugehen, dass sich auch die relevanten hydrologischen und morphodynamischen Prozesse und damit auch das grundsätzliche Verhalten der Nebenflüsse vom Prinzip her ähneln. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Nebenflüsse, die Este und die Krückau, als Fokusgewässer ausgewählt. Diese werden im Folgenden stellvertretend für alle Nebenflüsse einer besonders detaillierten Betrachtung unterzogen.

Die Auswahl von Fokusgewässern ist sinnvoll, da eine ganzheitliche Betrachtung der hydrologischen und morphodynamischen Prozesse in einem Nebenfluss auf der Grundlage einer wasserbaulichen Systemanalyse einen großen Aufwand bedeutet. Außerdem ist davon auszugehen, dass die zumindest entwickelten Methodiken sowie ein Teil der grundsätzlichen Erkenntnisse auf die anderen Nebenflüsse übertragbar sind. Bei der Beurteilung der Übertragbarkeit von Erkenntnissen ist allerdings stets zu beachten, dass zwischen den Nebenflüssen auch spezifische Unterschiede bestehen, die z.B. auf die

<sup>11</sup> Sofern die Tidegrenze nicht durch ein Bauwerk bestimmt wird, handelt es sich um eine ungefähre Angabe.

Lage, morphologische Charakteristiken, die Ausprägung von Prozessen und die Steuerung von Bauwerken zurückzuführen sind.

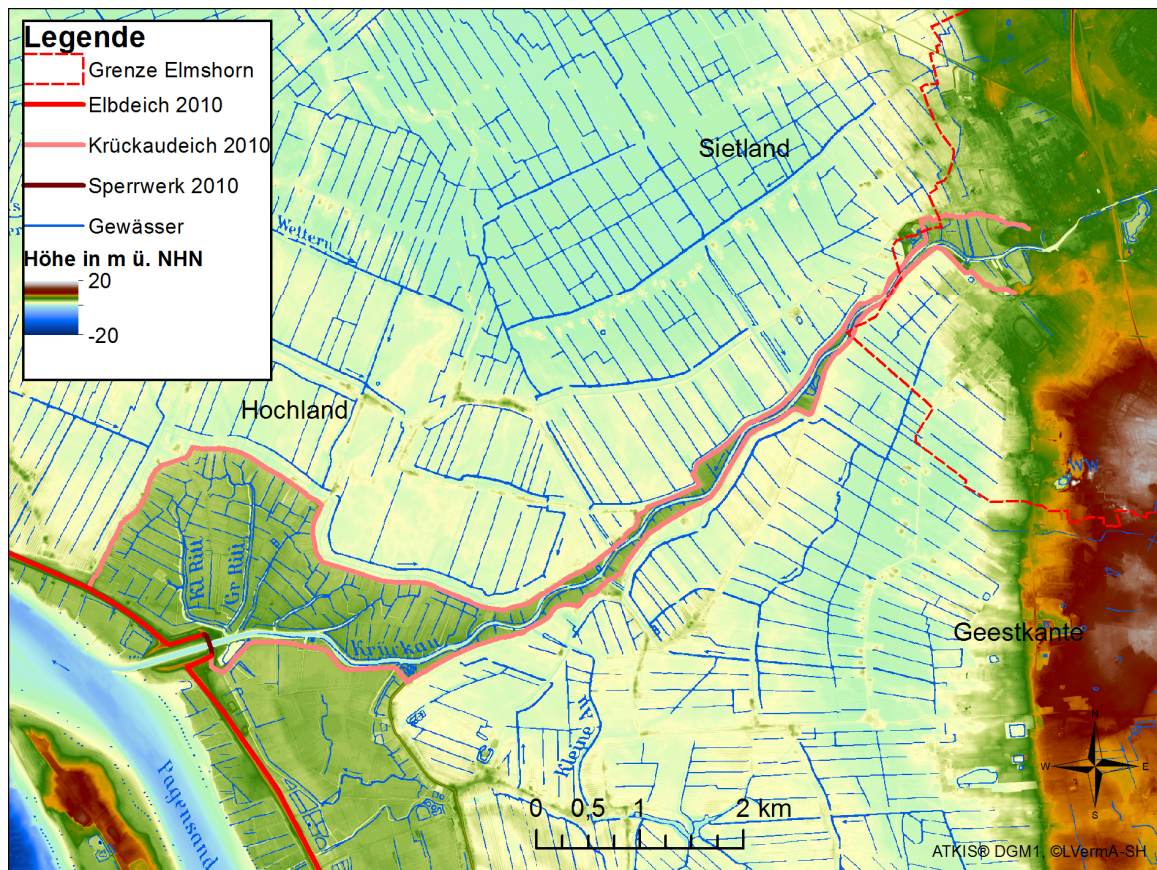
Bevor mit der Beantwortung der Fragestellungen bezüglich des Hochwasserschutzes, der Morphodynamik und der Auswirkungen des Klimawandels im Detail begonnen werden kann, muss der Ist-Zustand präzise erfasst und beschrieben werden. Dies geschieht in den beiden nachfolgenden Abschnitten 4.1 (Hochwasserschutz und Entwässerung des Hinterlandes) und 4.2 (Hydrologie und Morphologie). Der anschließende Abschnitt 4.3 ist der statistischen Einordnung seltener Schließereignisse gewidmet. In Abschnitt 4.4 wird auf die Morphodynamik und die morphologische Entwicklung eingegangen. Beide Abschnitte konzentrieren sich im Wesentlichen auf die beiden Fokusgewässer.

Die dritte Fragestellung, die nach den Auswirkungen des Klimawandels und möglichen Anpassungsmaßnahmen fragt, wird aufgrund der weitgehenden thematischen Eigenständigkeit in dem separaten Kapitel 5 bearbeitet.

#### **4.1 Hochwasserschutz und Entwässerung des Hinterlandes**

Der heutige Zustand der Nebenflüsse und ihrer Einzugsgebiete ist das Resultat einer jahrhundertelangen anthropogenen Prägung (vgl. Abschnitt 3.2). Im Folgenden werden die wesentlichen Charakteristiken des heutigen Zustandes am Beispiel der Krückau erläutert. Die Beschreibung ist charakteristisch für alle Nebenflüsse der Unterelbe.

Abbildung 33 zeigt eine Übersicht über die Geländehöhen, die Hochwasserschutzlinien sowie die Entwässerungsstruktur im Bereich der Krückau. An den Geländehöhen sind die höhergelegene Geest (> 2,5 m ü. NHN, Farben: Grüntöne) und die tiefliegende Marsch (< 2,5 m ü. NHN, Farben: Beige, Türkis) deutlich erkennbar. Die Geestkante, d.h. der Übergang von der Geest zur Marsch, vollzieht sich in Form eines abrupten Höhengsprungs um mehrere Meter. Innerhalb der Marschflächen ist ein leichtes Höhengefälle von der Elbe in Richtung Geest zu erkennen. Die höhergelegenen Bereiche nahe der Elbe werden als Hochland, die tieferliegenden geestnahen Bereiche als Sietland bezeichnet. Der Höhenunterschied ist auf die Entstehungsgeschichte der heutigen Marschen zurückzuführen, die mit dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 10.000 Jahren begann. Damals führte der steigende Meeresspiegel zur Überflutung der bis dahin trockenen Landfläche zwischen der Geest und der Elbe. In der Folge wuchsen die Marschflächen, die heute als Elbmarsch bezeichnet werden, durch stetige Sedimentation von marinem Material auf. Zuletzt wurden die Flächen nur noch bei hohen Wasserständen überflutet, wobei sich das mitgeführte Material vorwiegend in Ufernähe ablagerte. In der Folge bildete sich nahe dem Ufer der Elbe das Hochland mit Geländehöhen zwischen etwa 1,0 und 2,5 m ü. NHN und nahe der Geestkante das Sietland mit Geländehöhen größtenteils unterhalb Normalnull aus.



**Abbildung 33: Geländehöhen und Entwässerungsnetz im Bereich des Unterlaufs der Krückau**

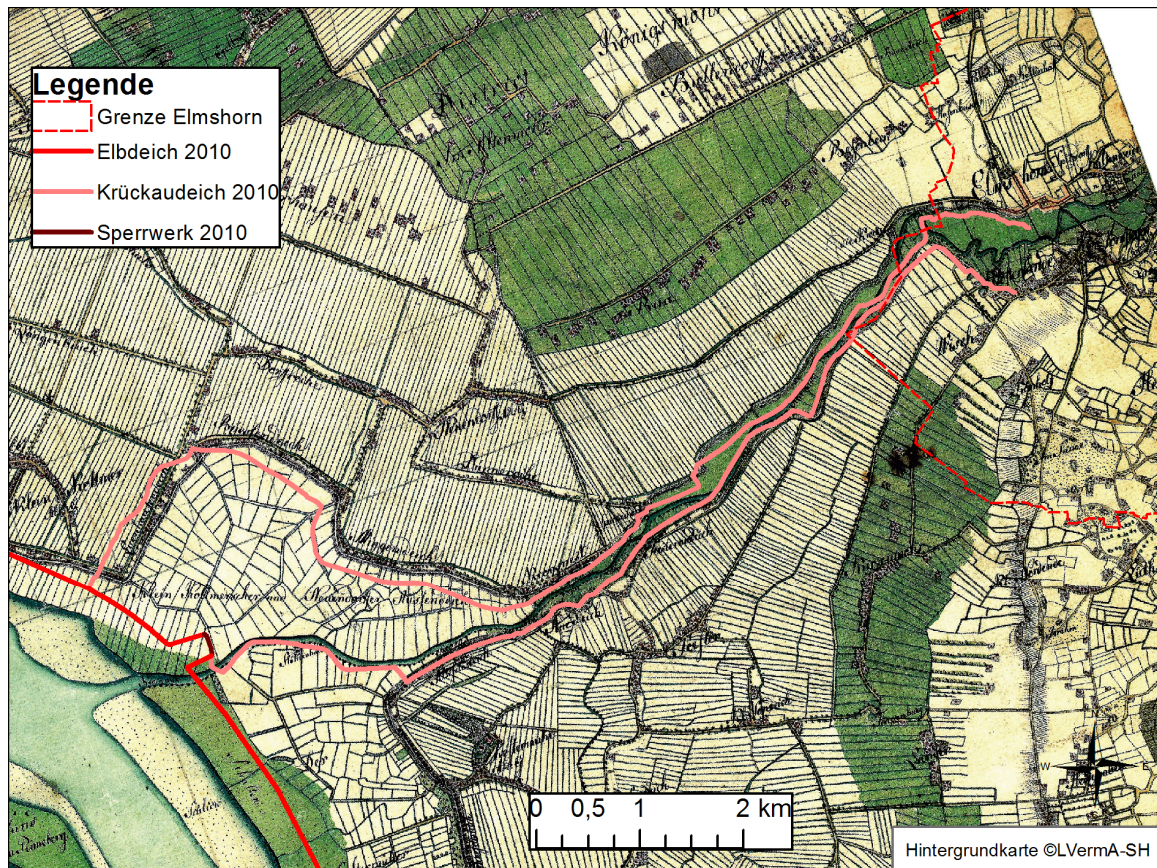
Um die Marschen vor Hochwassern zu schützen, wurden entlang der Ufer der Nebenflüsse Deiche errichtet. Diese beginnen an der Geestkante und reichen bis zur Elbe, wo sie in die Deiche der Elbe einbinden. Die Deichvorländer sind in der Regel verhältnismäßig schmal und weisen meist eine Breite von weniger als 100 m auf. In einigen Abschnitten sind die Vorländer jedoch auch deutlich breiter. Vor allem im Bereich der Mündung weisen einige Nebenflüsse wie die Krückau, die Pinnau, die Stör und die Oste ein deutlich breiteres Vorland (0,5 bis 2 km) auf. Diese Flächen sind zum Teil von kleineren Prielen (Ritts) durchzogen, die Relikte des einstigen Prielsystems der Elbmarsch sind.

Im Bereich der Deichvorländer betragen die Geländehöhen etwa 1,5 bis 2,5 m ü. NHN. Damit liegen die Flächen deutlich höher als jene im Deichhinterland. Der Höhenunterschied ist darauf zurückzuführen, dass die Deichvorländer in der Vergangenheit weiterhin vom Tidehochwasser überschwemmt wurden und durch sedimentierende Schwebstoffe anwuchsen. Mittlerweile werden die Vorländer aufgrund der erreichten Höhe und der Steuerung der Sperrwerke (s.u.) nur noch sehr selten überflutet, weshalb auch hier kein Anwachsen mehr stattfindet. Die Entwässerung der Flächen im Deichhinterland erfolgt über ein angelegtes System aus parallel verlaufenden Gräben. Quer zu den Gräben verlaufen Hauptgräben (Wettern), über die das Wasser zu den Sielen (oder Schleusen<sup>12</sup>) bzw. zu den Schöpfwerken gelangt. Diese entwässern in die Nebenflüsse (Hofmeister 1979).

Die ersten signifikanten anthropogenen Eingriffe in der Elbmarsch fanden zwischen der Mitte des zwölften und dem Ende des dreizehnten Jahrhunderts im Zuge der Hollerkolonisation statt. Die

<sup>12</sup> Tiemann 2012 führt an: „Heutzutage werden die Begriffe „Siel“ und „Schleuse“ gleichbedeutend verwendet. Für den Hamburger Teil des Alten Landes hat sich der Begriff „Siel“ durchgesetzt, während in der I. und II. Meile „Schleuse“ gebräuchlich ist.“ Im Rahmen dieser Arbeit wird gemäß DIN 4049, Teil 3: 1994 der Begriff Siel verwendet.

Eingriffe hatten das Ziel, die Marschen urbar zu machen (Jensen 1916; Tiemann 2012). Die heutige Struktur der Entwässerung und der Hochwasserschutzlinien existiert prinzipiell bereits seit einigen Jahrhunderten. Historische Karten aus dem Ende des 18. Jahrhunderts (Varendorf 1984) zeigen an den Nebenflüssen bereits Deichlinien, deren Verläufe den heutigen Verläufen im Wesentlichen entsprechen (Abbildung 34). Auch die größeren Wettern, wie z.B. die kleine Au in Abbildung 34, sind bis heute erhalten geblieben, ebenso wie das Netz aus den kleineren Gräben im Deichhinterland. Die Anlagen wurden laufend ertüchtigt und optimiert, u.a. wurden die Deiche erhöht und das Grabennetz im Deichhinterland ausgedünnt. Außerdem gab es wesentliche Neuerungen wie die Einführung der Schöpfwerke und den Bau der Sperrwerke, die die Niederungen der Nebenflüsse vor Sturmfluten schützen.



**Abbildung 34: Historische Übersichtskarte des Bereichs um den Unterlauf der Krückau (Auszug aus der Topographisch Militärische Charte des Herzogtums Holstein 1789-1796, Varendorf 1984)**

Grundsätzlich lassen sich die Anlagen entsprechend ihrer Funktion in die beiden nachfolgend genannten Kategorien unterteilen, denen jeweils ein eigener Abschnitt gewidmet ist:

- i) Anlagen zum Schutz des Hinterlandes vor Überflutungen infolge Hochwasser im Nebenfluss und
- ii) Anlagen zur Entwässerung von Niederschlags- und Grundwasser zum Schutz des Hinterlandes vor lokalen Überflutungen.

### 4.1.1 Hochwasserschutzanlagen

Die wesentlichen Anlagen zum Schutz des Hinterlandes der Nebenflüsse vor Überflutungen sind die Deiche (Abbildung 35) entlang der Ufer der Nebenflüsse und Sperrwerke an den Mündungen (Abbildung 36). Die Höhen der Deiche variieren in Abhängigkeit des Nebenflusses und der Lage vor oder hinter dem Sperrwerk zwischen rd. 3,5 m ü. NHN und rd. 8,0 m ü. NHN. Am höchsten sind die Deichabschnitte vor den Sperrwerken, d.h. zwischen Sperrwerk und Elbdeich, die weiterhin den Sturmflutbelastungen ausgesetzt sind. Auf der Binnenseite der Sperrwerke haben die Deiche entweder ein konstantes oder ein in Richtung Oberstrom leicht abnehmendes Höhenniveau. Die Längen der Deiche variieren vor allem in Abhängigkeit der Länge der Nebenflüsse. Tabelle 8 fasst die Längen der Deichlinien hinter den Sperrwerken zusammen. Die Oste verfügt mit 124,2 km über die längste Deichlinie, die Schwinge mit 6,4 km über die kürzeste. Insgesamt haben die Deiche an den Nebenflüssen der Unterelbe eine Gesamtlänge von knapp 400 km, was die heutige Länge der Elbdeiche zwischen der Nordsee und dem Wehr bei Geesthacht von knapp 270 km deutlich übertrifft.



Abbildung 35: Deich an der Krückau

Tabelle 8: Übersicht über Sperrwerke und Deichlängen an Nebenflüssen der unteren Tideelbe (Daten: WSV, LKN SH, NLWKN)

Fluss	Länge der Deichlinie hinter dem Sperrwerk in km	Baujahr Sperrwerk	Schließwasserstand in NHN	Betreiber
Oste	124,2	1968	2,45, ggf. abhängig vom Oberwasser	WSA Cuxhaven
Stör	107,8	1975	2,4	LKN SH
Krückau	23,4	1969	2,2	LKN SH
Pinnau	37,3	1969	2,2	LKN SH
Schwinge	6,4	1971	2,4	NLWKN
Lühe	24,6	1968	2,2 und abhängig vom Oberwasser	NLWKN
Este	20,1	2000	2,8	HPA
Summe	392,8			

Eine entsprechend hohe Bedeutung ist daher den in den 1960er und 1970er Jahren errichteten Mündungssperrwerken beizumessen. Durch deren Schließung im Sturmflutfall wird die Länge der Deichlinie, die den Sturmflutwasserständen ausgesetzt ist, deutlich verkürzt wird. Die Deiche stromauf der Sperrwerke zählen seit deren Inbetriebnahme zur zweiten Deichlinie. Sie werden in Niedersachsen als *Schutzdeiche* und in Schleswig-Holstein als *Mitteldeiche* bezeichnet. Der wesentliche Unterschied für die Deiche liegt in der Art und der Höhe der Belastungen, denen sie ausgesetzt sind. Vor der Inbetriebnahme der Sperrwerke wurden die Deiche mehrmals pro Jahr hohen Sturmflutwasserständen und den damit einhergehenden hohen Belastungen aus Wasserdruck, Strömungen und Wellen ausgesetzt.

Durch den Betrieb der Sperrwerke werden die Deiche deutlich seltener hohen Belastungen ausgesetzt, nämlich nur noch dann, wenn der Oberwasserabfluss infolge einer lange andauernden Sperrwerksschließung zu einem Aufstau führt. Außerdem sind die Belastungen im diesem Fall insgesamt geringer, da die Wasserstände infolge Aufstau des Oberwassers in der Regel geringer ausfallen als die Sturmflutwasserstände. Zudem sind die Strömungsgeschwindigkeiten bei geschlossenem Sperrwerk deutlich geringer als im Fall einer frei einlaufenden Sturmflut.

Bedingt durch die geringeren Belastungen waren in den letzten Jahrzehnten keine Anpassungsmaßnahmen wie Deicherhöhungen erforderlich, so dass die Deichhöhen in der Regel den Standard und das Schutzniveau der 1960er und 1970 Jahre aufweisen. Im selben Zeitraum wurden die Deiche und Schutzanlagen entlang der Elbe mehrfach erhöht und optimiert (LSBG 2012). Die Lage der Sperrwerke einige hundert Meter stromauf der Mündung, bzw. unmittelbar an der Mündung, ergibt sich nach (Gätjen 1977) aus mehreren Faktoren. Bei der Planung wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- i) Starke Verkürzung der ersten Deichlinie
- ii) Ausreichend Stauraum für das Oberwasser
- iii) Gerade Anlaufstrecke für die Schifffahrt
- iv) Baugrundverhältnisse

Um die Schifffahrt während der Bauzeit möglichst wenig zu beeinflussen, wurden die Sperrwerke soweit möglich in einem neuen Durchstich errichtet. Der nach Inbetriebnahme des Sperrwerks überflüssig gewordene alte Flusslauf wurde verfüllt. In den meisten Fällen ergaben sich durch den neuen Durchstich eine Verkürzung sowie eine Begradigung des Flusslaufes (Gätjen 1977).

Die Dimensionierung der Durchflussquerschnitte erfolgte mit dem Ziel, die vorhandenen Querschnitte im Mündungsbereich möglichst wenig zu verbauen. Entsprechend der Breite der Querschnitte verfügen die Sperrwerke über eine oder mehrere Öffnungen. Jedes Sperrwerk verfügt über mindestens eine Schifffahrtsöffnung, deren Breite und deren Drempeelhöhe an die Belange der Schifffahrt angepasst sind. Diese Öffnung wird durch zwei Stemmtorpaare verschlossen. Einige Sperrwerke haben zusätzliche Durchflussöffnungen, die entweder mit Hubtoren oder Segmentverschlüssen versehen sind. Alle Öffnungen sind mit zwei unabhängig voneinander angetriebenen Verschlüssen versehen, um eine doppelte Torsicherheit zu erzielen (Gätjen 1977). Für weitere detaillierte Ausführungen wie z.B. Konstruktionsdetails und Ausrüstung sei an dieser Stelle auf (Gätjen 1977) verwiesen.

Die Sperrwerke an den Mündungen der Nebenflüsse (Abbildung 36) haben neben ihrer Hauptaufgabe – dem Schutz der Niederungen entlang der Nebenflüsse vor Überflutungen – weitere Aufgaben, wie

z.B. die Berücksichtigung der Belange der Land- und Wasserwirtschaft, der Schifffahrt sowie des Naturschutzes (NLWKN 2007).



**Abbildung 36: Das geschlossene Krückau-Sperrwerk, Blick in Richtung Elbe**

Die Aufgaben und die zur Umsetzung erforderliche Betriebsweise sind für jedes Sperrwerk in Form einer Betriebsordnung geregelt. Beispielsweise besagt die Betriebsordnung des Krückau-Sperrwerks:

*„Das Sperrwerk soll [...] verhindern, dass das Stadtgebiet von Elmshorn und die Krückau-Niederung durch Sturmfluten gefährdet oder durch Zusammentreffen hoher Oberwasserzuflüsse mit ungünstigen Tiden beeinflusst werden. [...] Das Sperrwerk muss so rechtzeitig geschlossen werden, dass ein für die Zeit der Schließung genügend großer Stauraum für das Oberwasser zur Verfügung steht [...].“* (Amt für ländliche Räume Husum 2007).

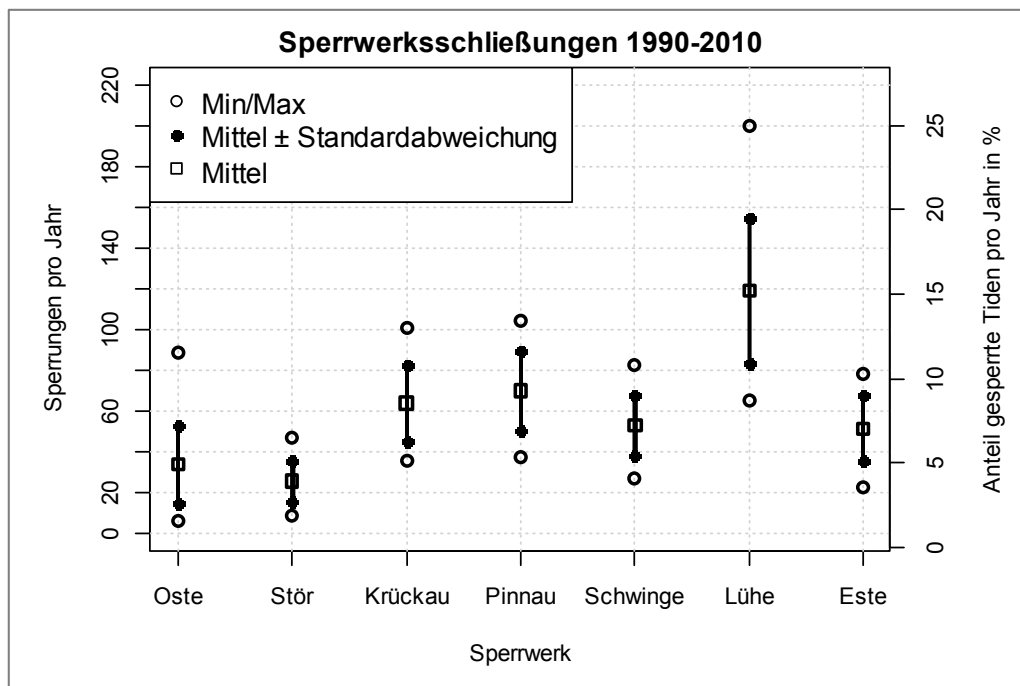
Prinzipiell sind nach (Gätjen 1977) drei Betriebsarten der Sperrwerke zu unterscheiden:

- i) Die *Vollsperrung*, bei der die Tore zum Zeitpunkt des Tnw geschlossen werden,
- ii) die *nachträgliche Vollsperrung*, bei der die Tore geschlossen werden, wenn der Schließwasserstand erreicht ist und
- iii) die *gedrosselte Sperrung*, bei der die Tore nur zum Teil geschlossen werden.

Ein Sonderfall der *gedrosselten Sperrung* ist der Spülbetrieb, bei dem die Tore bei ablaufendem Wasser kurzzeitig ganz oder teilweise geschlossen werden, um einen Aufstau zu generieren. In dessen Folge durchströmt das angestaute Wasser den Sperrwerksbereich mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit, wodurch die Erosion von abgelagertem Material begünstigt wird.

Der Regelfall an den Nebenflüssen der Tideelbe ist die *nachträgliche Sperrung*. Außerdem wird an einigen Sperrwerken (z.B. Äußeres Este-Sperrwerk) ein regelmäßiger Spülbetrieb gefahren. Abbildung 37 gibt eine Übersicht über die Häufigkeiten von Schließungen der Mündungssperrwerke ausgewählter Nebenflüsse der Tideelbe im Zeitraum 1990-2010. In der Darstellung sind nur

Vollsperrungen und nachträgliche Vollsperrungen berücksichtigt. An der linken Ordinate kann die absolute und an der rechten Ordinate die relative Häufigkeit der gesperrten Tiden pro Jahr abgelesen werden. Letztere basiert auf der Annahme von 706 Tiden pro Jahr. Am häufigsten wird das Lühe-Sperrwerk geschlossen (120 Sperrungen), am seltensten das Stör- sowie das Oste-Sperrwerk (26 bzw. 34 Sperrungen). Je nach Sperrwerk werden im Mittel zwischen 5% und 15% der Tiden pro Jahr gesperrt. Mit Ausnahme der Oste (im Jahr 2009) ist an allen Sperrwerken die minimale Anzahl an Sperrungen im Jahr 1996 zu verzeichnen. In diesem Jahr waren zwischen zwei und zehn Prozent aller Tiden beeinflusst. Die maximale Anzahl der Sperrungen trat in unterschiedlichen Jahren auf (Stör und Este im Jahr 1990, Oste 2001, Krückau und Pinnau 2002, Schwinge und Lühe 2007). Im Jahr der maximalen Anzahl der Sperrungen waren 9% bis 25% aller Tiden beeinflusst. Die verhältnismäßig großen Standardabweichungen zeigen die starke Streuung innerhalb der Jahre.



**Abbildung 37: Durchschnittliche Anzahl der Schließungen pro Jahr (Zeitraum 1990 - 2010) ausgewählter Mündungssperrwerke von Nebenflüssen der Unterelbe (Daten: WSA Hamburg)**

#### 4.1.2 Entwässerung des Hinterlandes

Wesentliche Anlagen zum Schutz vor lokalen Überflutungen im Hinterland sind zum einen das Entwässerungssystem, das in urbanen Gebieten überwiegend aus einem unterirdischen Kanalnetz und in landwirtschaftlich genutzten Gebieten aus einem Grabensystem besteht (Abbildung 38) und zum anderen die Siele und Schöpfwerke (Abbildung 39 und Abbildung 40), die das Wasser aus dem Entwässerungssystem durch die Deiche hindurch in die Nebenflüsse einleiten.



**Abbildung 38: Wettern im Deichhinterland der Este**

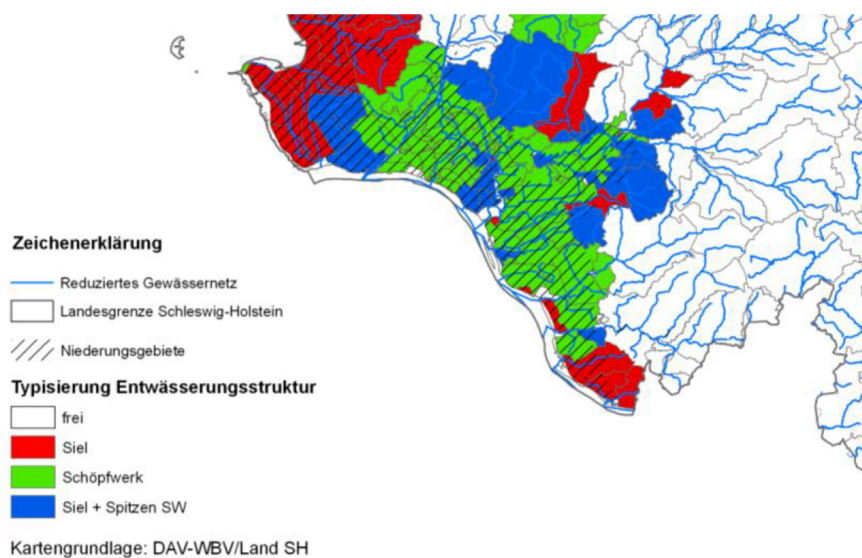


**Abbildung 39: Siel an der Este**



**Abbildung 40: Schöpfwerk an der Este**

Die Siel-Entwässerung erfolgt durch das natürliche Gefälle und funktioniert nur, wenn der Außenwasserstand für einen ausreichend langen Zeitraum niedriger ist als der Binnenwasserstand. Mit zunehmender Eindeichung des Sietlandes stiegen die Wasserstände in der Elbe an, so dass auch das Hochland schlechter entwässert werden konnte und häufiger überflutet wurde. In der Folge wurden auch diese Flächen eingedeicht (Tiemann 2012). Das Prinzip der Entwässerungssysteme aus dem Sietland wurde übernommen. Weiter ansteigende Wasserstände in der Elbe und gleichzeitige gebietsweise Absackungen des Geländes führten zu einer weiteren Verschlechterung der Entwässerungssituation, so dass schließlich Schöpfanlagen errichtet wurden. Ab Mitte des 18. Jahrhunderts fanden Windmühlen Verwendung, die eine Schnecke antrieben. Ab dem 19. Jahrhundert kamen dampfbetriebene und im 20. Jahrhundert zunächst diesel- und schließlich elektromotorgetriebene Schöpfwerke zum Einsatz (u.a. Karstens 1982; Tiemann 2012). Heutzutage erfolgt die Entwässerung der Elbmarsch fast ausschließlich über Schöpfwerke, was in Abbildung 41 deutlich wird.



**Abbildung 41: Entwässerungsstruktur in den Niederungsbereichen im südwestlichen Schleswig-Holstein (aus AG Niederungen 2050 2014)**

Der Betrieb der Schöpfwerke erfolgt nach Bedarf, wobei die Betriebszeiten nicht flächendeckend erfasst werden. Im Regelfall setzt der Betrieb der Anlagen mit einer leichten zeitlichen Verzögerung zum Beginn von Niederschlagsereignissen ein (Fröhle und Nehlsen 2013). Allerdings ist aus der Entwässerungspraxis auch bekannt, dass die Speicherkapazität des Entwässerungssystems zur Wasserbewirtschaftung genutzt wird. Dies kann einerseits im Vorfeld von Starkregenereignissen und schweren Sturmfluten in Form einer Vorratsentwässerung oder andererseits in Form einer Vorratsspeicherung zu Bewässerungszwecken erfolgen.

Abbildung 42 zeigt die Standorte der Schöpfwerke an ausgewählten Nebenflüssen sowie die für jeden Nebenfluss aufsummierte nominelle Förderleistung. Außerdem sind die Flächen mit einer Geländehöhe kleiner als 3,0 m ü. NHN farblich gekennzeichnet. Flächen über 3,0 m ü. NHN liegen deutlich über dem MThw und weisen aufgrund ihrer eiszeitlichen Entstehungsgeschichte meist ein größeres Höhengefälle auf, was eine freie, nicht-tidebeeinflusste Entwässerung dieser Flächen wahrscheinlich macht. Mit diesem vereinfachten Ansatz lässt sich das Ausmaß der künstlich zu entwässernden Flächen im Bereich der Elbmarsch verdeutlichen. Auf die Schöpfwerksleistungen wird in Abschnitt 4.2.2 im Detail eingegangen.

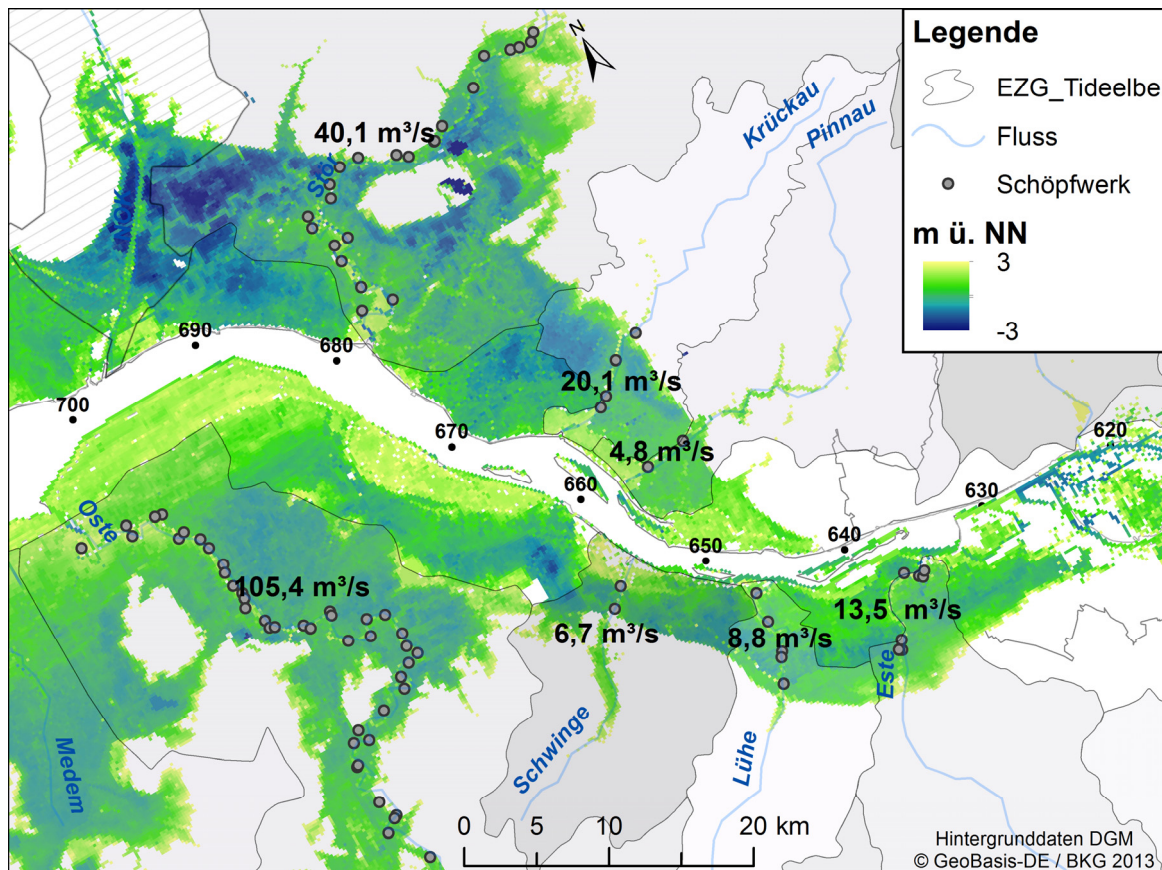


Abbildung 42: Standorte der Schöpfwerke an ausgewählten Nebenflüssen und die aufsummierte nominelle Förderleistung der Schöpfwerke je Nebenfluss (Zusammenstellung nach Stadelmann 2010 und Angaben der Entwässerungsverbände)

## 4.2 Hydrologie und Morphologie

### 4.2.1 Morphologische Merkmale

Die heutigen Gewässerläufe der tidebeeinflussten Abschnitte der Nebenflüsse sind stark anthropogen geprägt. Bei der Beurteilung des Veränderungsgrades im Rahmen der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) wurden die Abschnitte als mäßig bis stark veränderte Wasserkörper eingestuft (Berichtsportal WasserBLICK/BFG 2009). Gründe für diese Einstufung sind u.a. signifikante anthropogene Veränderungen wie z.B. Begradigungen, Böschungssicherungen, Querbauwerke, Eindeichungen und nicht zuletzt die Mündungssperwerke. Diese Veränderungen nehmen Einfluss auf die natürliche Tide- und Sedimentdynamik. Dieser veränderte Zustand der Unterläufe wird im Folgenden anhand wesentlicher morphologischer Merkmale beschrieben.

#### 4.2.1.1 Nebenflüsse

Eine Aufzählung der betrachteten Flüsse sowie eine Übersicht der wesentlichen Merkmale der betrachteten Unterläufe erfolgt in Tabelle 9. Die mit Abstand längsten tidebeeinflussten Abschnitte haben die Oste (L = 70 km) und die Stör (L = 50,4 km), gefolgt von der Pinnau (L = 19,1 km). Lühe (L = 12,6 km), Este (L = 12,4 km) und der Krückkau (L = 10,5 km). Diese weisen vergleichbare Längen

auf. Die Schwinge ( $L = 4,6$  km) hat den mit Abstand kürzesten Unterlauf. Einige Flussschlingen sind als Relikte der ursprünglich stark geschwungenen Linienführung der Unterläufe bis heute erhalten geblieben. Erwartungsgemäß haben die beiden mit Abstand längsten Unterläufe von Oste und Stör auch die meisten Flussschlingen<sup>13</sup>. Allerdings hat der drittlängste Unterlauf der Pinnau weniger Flussschlingen als der wesentlich kürzere Unterlauf der Lühe. Diese weist das mit Abstand größte Verhältnis von Fließlänge zur Anzahl der Flussschlingen ( $L/n = 1,83$ ) aller betrachteten Unterläufe auf. Es folgen die Krückau ( $L/n = 1,33$ ) und die Este ( $L/n = 1,29$ ). Die Unterläufe der Schwinge ( $L/n = 0,65$ ) und der Oste ( $L/n = 0,83$ ) weisen sehr kleine Verhältnisse auf.

In Tabelle 9 sind außerdem für jeden Unterlauf die gemittelten Bogenlängen ( $l_M$ ), die gemittelte Wellenlänge ( $l_w$ ) und die gemittelten Amplituden ( $a_M$ ) aller Flussschlingen angegeben. Aus dem Verhältnis der mittleren Bogenlänge  $l_M$  zur mittleren Wellenlänge  $l_w$  ergibt sich der Windungsfaktor. Natürliche Flüsse mit einer mäandrierenden Laufform weisen naturgemäß einen hohen Windungsfaktor ( $C_W$ ) auf, der nach Yalin und da Silva zwischen eins und fünf liegen kann, wobei laut den Autoren bei einem Windungsfaktor kleiner 1,5 nicht von einem mäandrierenden Gewässerlauf gesprochen wird (Yalin und Da Silva, A. M. 2001). Dieser Definition zur Folge haben alle betrachteten Unterläufe mit Ausnahme der Lühe ( $C_W=1,5$ ) keinen mäandrierenden Gewässerlauf. Die betrachteten Unterläufe sind anhand des Windungsfaktors noch weiter zu differenzieren. Neben der Lühe weisen Stör ( $C_W=1,4$ ), Oste ( $C_W=1,35$ ) und Este ( $C_W=1,34$ ) einen vergleichsweise großen Windungsfaktor auf, während Pinnau ( $C_W=1,15$ ), Schwinge ( $C_W=1,09$ ) und Krückau ( $C_W=1,07$ ) einen sehr kleinen Windungsfaktor aufweisen, was gleichbedeutend mit einer sehr gestreckten Laufform ist.

**Tabelle 9: Morphologische Parameter ausgewählter Nebenflüsse**

Fluss	Länge des tidebeeinflussten Abschnittes	Anzahl Flussschlingen		mittlere Bogenlänge	mittlere Wellenlänge	mittlere Amplitude	Windungsfaktor
	L	n	n/L	$l_M$	$l_w$	$a_M$	$C_W=l_M/l_w$
	km	[-]		m	m	m	-
Oste	70	58	0,83	1050	780	297	1,35
Stör	50,4	57	1,13	992	711	290	1,40
Krückkau	10,5	14	1,33	700	653	129	1,07
Pinnau	19,1	20	1,05	688	600	142	1,15
Schwinge	4,6	3	0,65	535	490	92	1,09
Lühe	12,6	23	1,83	635	423	183	1,50
Este	12,4	16	1,29	612	456	175	1,34

Zur weiteren Beschreibung der Geometrie im Längs- und Querschnitt stehen Sohlpeilungen zur Verfügung, die im Rahmen der Beweissicherungsuntersuchung zur Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt (WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority 2012b) erhoben wurden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden in den Unterläufen der Nebenflüsse in definierten Abständen Querschnittsmessungen durchgeführt.

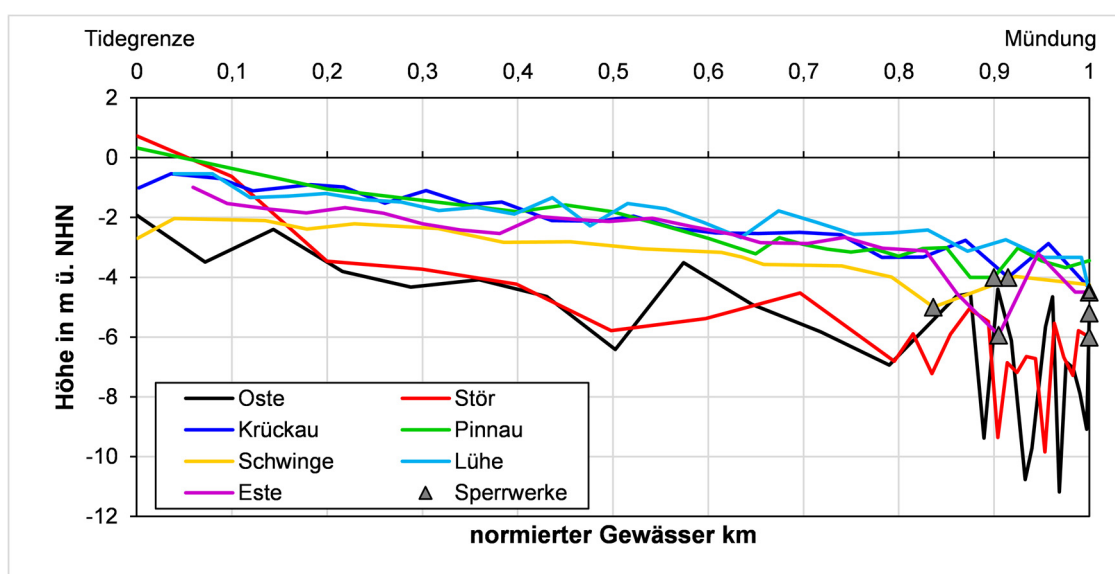
Abbildung 43 zeigt die Sohlhöhen des Talweges, d.h. der tiefste Sohlpunkt der Querprofile aufgetragen im Längsschnitt. Um die Flüsse, deren Unterläufe unterschiedliche Längen aufweisen, miteinander vergleichen zu können, sind die Fließkilometer über die jeweilige Gewässerlänge normiert. Der normierte Gewässer km 0 entspricht dabei dem Bundeswasserstraßen km 0. Der

<sup>13</sup> Alle Gewässerkrümmungen, die eine Änderung der Fließrichtung von mindestens 45° hervorrufen, werden als Flussschlinge gewertet.

normierte Gewässer km 1,0 entspricht der Mündung. Beim normierten Gewässer km 0 weisen die drei Unterläufe von Este, Oste und Schwinge die geringsten Sohlhöhen auf, was darauf zurückzuführen ist, dass diese eine künstliche Tidegrenze in Form eines Bauwerks haben. Die übrigen Unterläufe haben eine natürliche Tidegrenze, so dass die Sohle flach ausläuft. Bei der Krückau fällt allerdings die vergleichsweise geringe Sohlhöhe auf. In diesem Bereich befindet sich der Elmshorner Hafen.

Im weiteren Verlauf in Richtung Mündung treten die geringsten Sohlhöhen in den beiden längsten Nebenflüsse Oste und Stör auf. Diese betragen abschnittsweise weniger als -10 m ü. NHN. Auch im Bereich der Mündungssperrwerke treten die geringsten Sohlhöhen abermals in der Stör (-6,0 m ü. NHN) und der Oste (-5,2 m ü. NHN) auf. Im letzten Drittel schwanken die Sohlhöhen von Stör und Oste sehr stark, was auf die abschnittsweise geschwungene Laufform zurückzuführen ist. Hier treten die größten Tiefen in der Regel im Bereich der Prallhänge der Krümmungen auf.

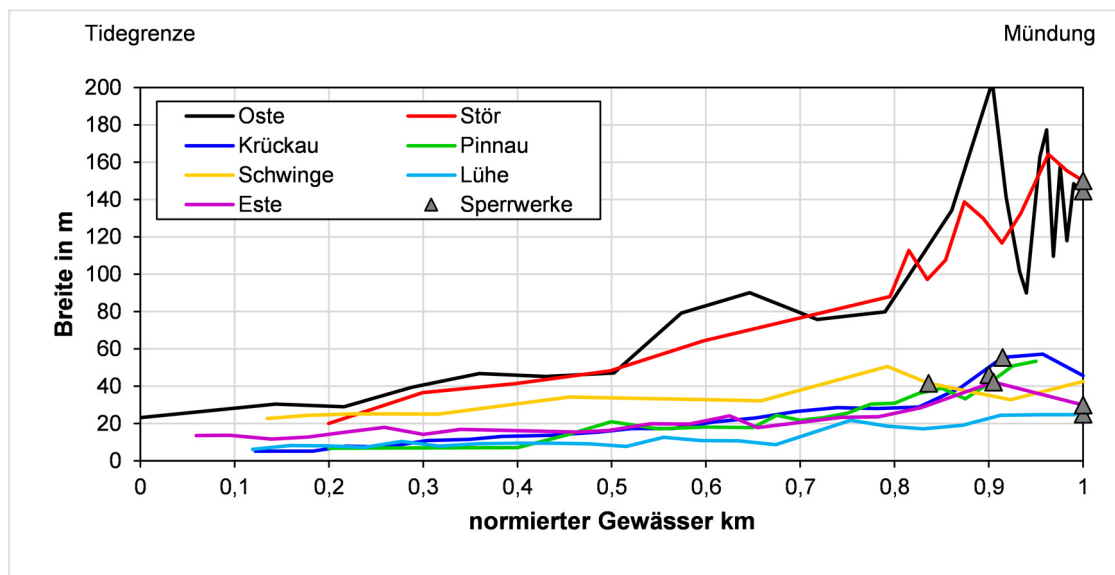
Die Schwinge stellt in vielerlei Hinsicht eine Besonderheit dar. Zum einen hat sie den kürzesten Unterlauf und zum anderen durchgehend vergleichsweise geringe Sohlhöhen (-2,0 bis -4,0 m ü. NHN). Die Unterläufe der übrigen vier Flüsse Krückau, Este, Pinnau und Lühe weisen einen ähnlichen Verlauf der Sohlhöhen auf. Mit Ausnahme einiger kürzerer Abschnitte nimmt die Sohlhöhe in Richtung Mündung kontinuierlich ab. Alle vier Flüsse haben die geringsten Sohlhöhen im Bereich der Sperrwerke, wobei die Este heraussticht, die den tiefsten Sohlpunkt im Bereich des Inneren Este-Sperrwerks hat.



**Abbildung 43: Längsschnitte ausgewählter Nebenflüsse im Jahr 2010. Dargestellt ist der tiefste Sohlpunkt der vermessenen Querschnitte (Daten: WSV)**

Abbildung 44 zeigt die Gewässerbreite etwa einen Meter unterhalb des mittleren Tidehalbwassers des jeweiligen Nebenflusses. Analog zu der Darstellung des tiefsten Sohlpunktes ist auch in dieser Darstellung die Fließlänge normiert. Im Bereich des normierten Gewässer km 0 kann mit Ausnahme der Oste aufgrund der unzureichenden Datengrundlage keine sinnvolle Auswertung der Profildbreite erfolgen. Etwa ab dem normierten Gewässer km 0,2 sind für alle Nebenflüsse Werte vorhanden. In diesem Bereich liegen die Breiten je nach Nebenfluss zwischen 5 und 30 Metern. Im weiteren Verlauf weisen die beiden größten Flüsse Stör und Oste die größten Breiten auf. In Richtung stromab nehmen die Breiten auf über 160 m (Stör) und 200 m (Oste) zu. Im letzten Drittel schwanken die Breiten sehr

stark, was wiederum auf die abschnittsweise geschwungene Laufform mit den typischen Querschnitten zurückzuführen ist.



**Abbildung 44: Längsschnitte ausgewählter Nebenflüsse im Jahr 2010. Dargestellt ist die Gewässerbreite 1 m unterhalb des mittleren Tidehalbwassers auf der Grundlage der vermessenen Querschnitte (Daten: WSV)**

Die Schwinge sticht auch aufgrund ihrer großen Breite wieder heraus. Zwischen Tidegrenze und Mündung nimmt die Breite von etwa 20 m auf etwa 40 m zu. Die Unterläufe der Krückau, der Este und der Pinnau weisen einen ähnlichen Verlauf der Gewässerbreiten auf. Mit Ausnahme einiger weniger kürzerer Abschnitte nehmen die Breiten von unter zehn Metern bei der Tidegrenze auf etwa 20 m beim normierten Gewässer km 0,8 zu. Ab hier nehmen die Breiten deutlich zu und erreichen im Bereich der Mündungssperre rund 40 m. Der Unterlauf der Lühe zeigt eine Besonderheit. Zwischen der Tidegrenze und dem normierten Gewässer km 0,7 beträgt die Querschnittsbreite fast konstant 10 m, bevor sie dann sprunghaft auf 20 m ansteigt und bis zur Mündung wieder nahezu konstant bleibt.

Die Darstellung im normierten Längsschnitt eignet sich gut zum Vergleich verschiedener Nebenflüsse untereinander. Allerdings ermöglicht diese Art der verzerrten Darstellung keine Aussage zur Tiefen- und Breitenkonvergenz der Unterläufe. Diese Informationen sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Der angegebene Wert für die Breitenkonvergenz beschreibt die Veränderung der Gewässerbreite auf dem Niveau von einem Meter unterhalb des mittleren Tidehalbwassers (-0,7 bis -0,8 m ü. NHN). Der angegebene Wert für die Tiefenkonvergenz beschreibt die dazugehörige mittlere Fließtiefe.

Die angegebenen Werte gelten für den Abschnitt zwischen den normierten Gewässer km 0,2 und 1,0. Für den weiter stromauf gelegenen Abschnitt ist keine sinnvolle Auswertung der Daten möglich. Dementsprechend sind u.a. einige Häfen (Buxtehude, Horneburg, Elmshorn), die sich an der Tidegrenze befinden und in der Regel einen stark aufgeweiteten und vertieften Gewässerquerschnitt aufweisen, nicht in den Parametern berücksichtigt.

Die mit Abstand stärkste Tiefenkonvergenz mit einer Änderung der Gewässertiefe um -0,4 m pro km weist der Unterlauf der Schwinge auf. Es folgen Este (-0,26 m/km) und Krückau (-0,21 m/km) mit einer vergleichsweise starken mittleren Tiefenzunahme. Die Unterläufe von Lühe (-0,14 m/km),

Pinnau (-0,1 m/km), Stör (-0,05 m/km) und Oste (-0,05 m/km) weisen eine vergleichsweise geringe Veränderung der Gewässertiefe auf.

Bei der Breitenkonvergenz liegt auch der Unterlauf der Schwinge mit einer Zunahme der Breite von über fünf Metern pro km an der Spitze der betrachteten Flüsse. Es folgen Krückau (4,2 m/km), Stör (3,76 m/km), Este (3,26 m/km) und Pinnau (3,11 m/km) mit einer vergleichsweise starken Zunahme der Breite. Die Unterläufe von Oste (2,12 m/km) und Lühe (1,66 m/km) weisen eine vergleichsweise geringe Breitenkonvergenz auf.

**Tabelle 10: Mittlere Tiefen- und Breitenkonvergenz ausgewählter Nebenflüsse zwischen dem jeweiligen normierten Gewässer km 0,2 und der Mündung**

<b>Fluss</b>	<b>Tiefenkonvergenz</b>	<b>Breitenkonvergenz</b>
	<b>m/km</b>	<b>m/km</b>
Oste	-0,05	2,12
Stör	-0,05	3,76
Krückau	-0,21	4,20
Pinnau	-0,10	3,11
Schwinge	-0,40	5,08
Lühe	-0,14	1,66
Este	-0,26	3,26

Eine weitere morphologische Eigenschaft, die vor allem aus Sicht des Hochwasserschutzes relevant ist, ist der vorhandene Stauraum stromauf der Mündungssperre. Hier wird im Fall einer Sperrung der Binnenabfluss aufgestaut. Je nach der Größe des Binnenzuflusses und der Größe des Stauraumes steigt der Wasserspiegel schneller oder langsamer an. Die verfügbaren Volumina, die unterhalb definierter Höhengniveaus zur Verfügung stehen, sind in Abbildung 45 dargestellt. Da der Stauraum zum einen von der Breite und der Länge des Gewässers sowie der Breite der Deichvorländer abhängt, verfügen die beiden längsten Nebenflüsse Stör und Oste über den größten Stauraum. Im Bereich des mittleren Tidehochwassers, das etwa bei 2,0 m ü. NHN liegt, ist das verfügbare Volumen der Stör deutlich größer als das der Oste. Da beide Unterläufe in etwa gleich lang sind, ist daraus zu schließen, dass der Gewässerquerschnitt der Stör deutlich größer ist als der Querschnitt der Oste. Dies ist bei der Betrachtung der Querschnittsbreiten (Abbildung 44) nicht aufgefallen, da die Breiten der Gewässerquerschnitte auf dem Höhengniveau von -0,7 bis -0,8 m ü. NHN betrachtet werden. Die Unterschiede zwischen Stör und Oste werden jedoch erst ab einem Niveau von etwa -0,5 m ü. NHN deutlich.

Die Krückau hat den drittgrößten Stauraum der betrachteten Nebenflüsse, was weniger auf die Länge des Unterlaufs, sondern vielmehr auf das breite Deichvorland nahe der Mündung zurückzuführen ist. Es folgen die Pinnau, die Este und die Lühe, die sehr kleine Deichvorländer haben. An der Lühe ist mit dem Hochwasserentlastungspolder Bullenbruch bereits zusätzlicher Stauraum in Planung.

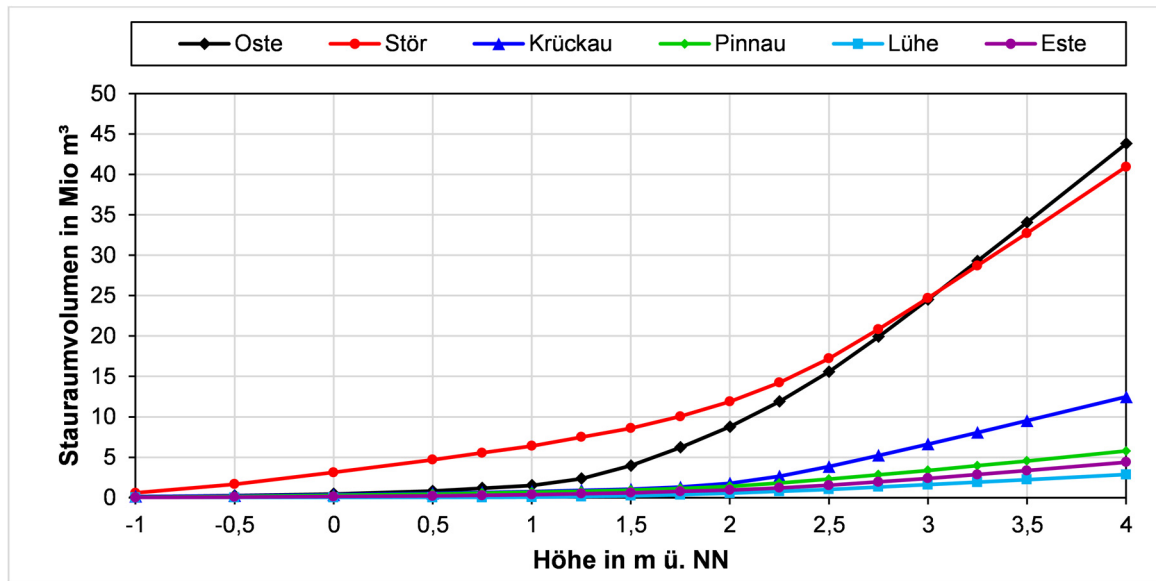


Abbildung 45: Verfügbarer Stauraum in den Gewässerquerschnitten und dem Deichvorland der Nebenflüsse stromauf der Mündungssperrwerke in Abhängigkeit von der Einstauhöhe

#### 4.2.1.2 Fokusgewässer Este und Krückau

Für die beiden Fokusgewässer stehen weitere Informationen zu morphologischen Merkmalen zur Verfügung, die aus den regelmäßigen Fächerlotpeilungen (Abschnitt 2.2.2), Befahrungen bei Niedrigwasser sowie Beprobungen des Sohlmaterials stammen. Daraus lassen sich u.a. detaillierte Aussagen zu Sohlsubstraten und Uferstrukturen ableiten, die im Folgenden dargestellt sind.

Tabelle 11 gibt eine Übersicht über ausgewählte charakteristische Korngrößen der Sedimentproben. Die Informationen zur Krückau stammen aus (Donner 2014). Detailliertere Angaben zu den ermittelten Korngrößen in der Este sind Tabelle 36 im Anhang zu entnehmen.

Tabelle 11: Bereiche charakteristischer Korngrößen im Unterlauf von Krückau und Este

Sedimentart	Fluss	D10	D50	D90
		mm	mm	mm
Schluff mit tonigem und/oder feinsandigem Anteil	Este	Bis 0,005	0,021 – 0,037	0,045 – 0,061
	Krückau	Bis 0,007	0,031 – 0,050	0,056 – 0,094
Fein- oder Mittelsand mit schluffigem Anteil	Este	0,088 – 0,113	0,171 – 0,275	0,23 – 0,35
	Krückau	0,007	0,065	0,304

Auf der Grundlage der Auswertung der Sedimentproben sind folgende Aspekte festzuhalten:

- i) Die Zusammensetzung der Proben aus den Böschungsbereichen beider Flüsse ist ähnlich. Alle Proben weisen überwiegend Schluff auf, der tonige und/oder feinsandige Anteile enthält. Ausnahmen sind zwei Proben aus der Este (Buxtehuder Hafen) und eine Probe aus der Krückau (Prallhang bei Gewässer km 6,1), in denen überwiegend Mittelsand mit schluffigem und feinsandigem Anteil enthalten ist.
- ii) Die Zusammensetzung der Proben aus dem Bereich der Flussschläuche beider Flüsse weicht stärker voneinander ab. In etwa der Hälfte der Proben aus dem Flussschlauch der Este dominiert der mittelsandige Anteil, in der anderen Hälfte dominiert der schluffige Anteil. Die Proben aus der Krückau weisen hingegen alle einen dominanten schluffigen Anteil auf.

- iii) Die Proben aus den Flussschläuchen bestehen in der Regel aus gröberen Sedimenten als die Proben aus den unmittelbar angrenzenden Böschungsbereichen.
- iv) Schluffige Proben aus der Krückau haben eine etwas gröbere Kornzusammensetzung als schluffige Proben aus der Este.
- v) Im sperrwerksnahen Bereich haben alle Proben aus beiden Gewässern als Hauptbestandteil Schluff.

Die Beschaffenheit der Böschungen unterhalb der mittleren Wasserspiegellinien geht aus Befahrungen der Unterläufe beider Flüsse bei Tideniedrigwasser hervor. Innerhalb der urbanen Abschnitte von Elmshorn, Buxtehude, Estebrügge und Hove sind die Ufer durch Pflasterungen, massive Steinschüttungen oder Spundwände gesichert (Abbildung 46 und Abbildung 47). Außerhalb von urbanen Abschnitten sind die Böschungen fast durchgehend mit Wasserbausteinen gesichert. Die Dichte der Steinpackungen variiert abschnittsweise zwischen sehr dicht und stark aufgelockert. Die unteren sperrwerksnahen Abschnitte sind sehr massiv mit Wasserbausteinen gesichert. Im Bereich von Aufweitungen oder Gleithängen sind die Wasserbausteine von einer Schlickschicht überlagert (Abbildung 46 und Abbildung 47). Im Bereich der mittleren Wasserspiegellinie sind die Böschungen an beiden Flüssen fast durchgehend dicht mit Gras oder Röhricht bewachsen. Einige Uferabschnitte werden auch von Busch- und Baumgruppen gesäumt (Abbildung 46 und Abbildung 47).



**Abbildung 46: Typische Uferbeschaffenheiten am Unterlauf der Este: Röhricht bei Buxtehude Neuland (oben links), Steinschüttung (oben rechts), Spundwand bei Hove (unten links), Sohle bei Estebrügge (unten rechts)**



**Abbildung 47: Typische Uferbeschaffenheiten am Unterlauf der Este: Röhricht und Buschbewuchs beim Segelhafen Elmshorn (oben links), Spundwände im Elmshorner Hafen (oben rechts), Steinschüttung bei Seester (unten links), Steinschüttungen im Sperrwerksbereich (unten rechts)**

#### 4.2.2 Abflüsse, Wasserstände und Strömungen

Die Abflüsse, Wasserstände und Strömungen in den tidebeeinflussten Nebenflüssen werden maßgeblich geprägt durch:

- i) die hydrologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete, wie u.a. geographische Ausdehnung, Topographie, Relief, Vegetation/Flächennutzung, Bodenaufbau, Klima,
- ii) die Gezeiten, die aus der Nordsee über die Elbe in die Nebenflüsse einschwingen, und
- iii) die wasserwirtschaftlichen Anlagen, wie z.B. Wehre, Schöpfwerke, Sperrwerke.

Die Bewertung der hydrologischen Größen erfolgt auf der Grundlage von Messdaten und hydrologisch-numerischen bzw. hydrodynamisch-numerischen Modellergebnissen. Nachfolgend werden ausgewählte charakteristische Kenngrößen für Abflüsse, Wasserstände und Strömungen unterteilt nach Ober- und Unterlauf dargestellt.

##### 4.2.2.1 Abflüsse in den Oberläufen

In den Einzugsgebieten der Oberläufe erfolgt die Entwässerung des Niederschlags- und Grundwassers größtenteils im freien Gefälle. Eine Beeinflussung durch regelmäßig schwankende Wasserstände besteht nicht.

Während Einflussfaktoren wie die geographische Ausdehnung, Topographie, Relief und Bodenaufbau in der Regel nur wenig verändert sind, ist die Vegetation/Flächennutzung stark anthropogen verändert. In der Regel haben die Flächennutzungsarten Wald, Grünland und Ackerland in den Einzugsgebieten der Oberläufe einen Anteil von über 80% der gesamten Flächennutzung (Fröhle und Nehlsen 2013; Nehlsen et al. 2014). Die Abflussbildung auf diesen Flächen ist weitgehend natürlich. Eine Ausnahme stellen Grünland- oder Ackerlandflächen dar, in denen Drainageleitungen verlegt sind. Diese wirken beschleunigend auf die Entwässerung.

Die Flächen, die als Gebäude- und Freiflächen sowie Verkehrsflächen klassifiziert sind, weisen in der Regel einen vergleichsweise hohen Versiegelungsgrad auf. Deren Flächenanteil kann in den Einzugsgebieten der Oberläufe bis zu 15% betragen (Fröhle und Nehlsen 2013; Nehlsen et al. 2014). Eine versiegelte Oberfläche führt dazu, dass ein Großteil des Niederschlagswassers als Direktabfluss abgeführt wird. Vor allem im Bereich von neueren Baugebieten sind zum Rückhalt des Direktabflusses von den versiegelten Flächen Hochwasserrückhaltebecken vorgesehen.

An allen betrachteten Nebenflüssen wird der Wasserstand an mindestens einem Pegel oberhalb der Tidegrenze erfasst. Die Pegel werden durch die Länder betrieben. Für die meisten Pegel existiert eine Wasserstand-Abflussbeziehung, die auf der Grundlage von regelmäßigen temporären Abflussmessungen basieren. Unter Anwendung der Beziehung werden die gemessenen Wasserstandszeitreihen in Abflusszeitreihen umgerechnet. Aus den Wasserständen und Abflüssen werden ausgewählte Kennwerte abgeleitet und in den gewässerkundlichen Jahrbüchern (FFH und HPA 1990-2014) veröffentlicht.

Aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren, wie z.B. der Verkrautung in den Sommermonaten oder Ungenauigkeiten beim Abflussmessverfahren, sind die umgerechneten Abflusszeitreihen mit weitaus größeren Ungenauigkeiten belegt als die Wasserstandszeitreihen. Dennoch werden absolute Abflüsse oder Abflusspenden (Abfluss pro Einzugsgebietsfläche) oft bevorzugt eingesetzt. Abflüsse sind z.B. beim Vergleich von Gewässern untereinander deutlich aussagekräftiger als Wasserstände.

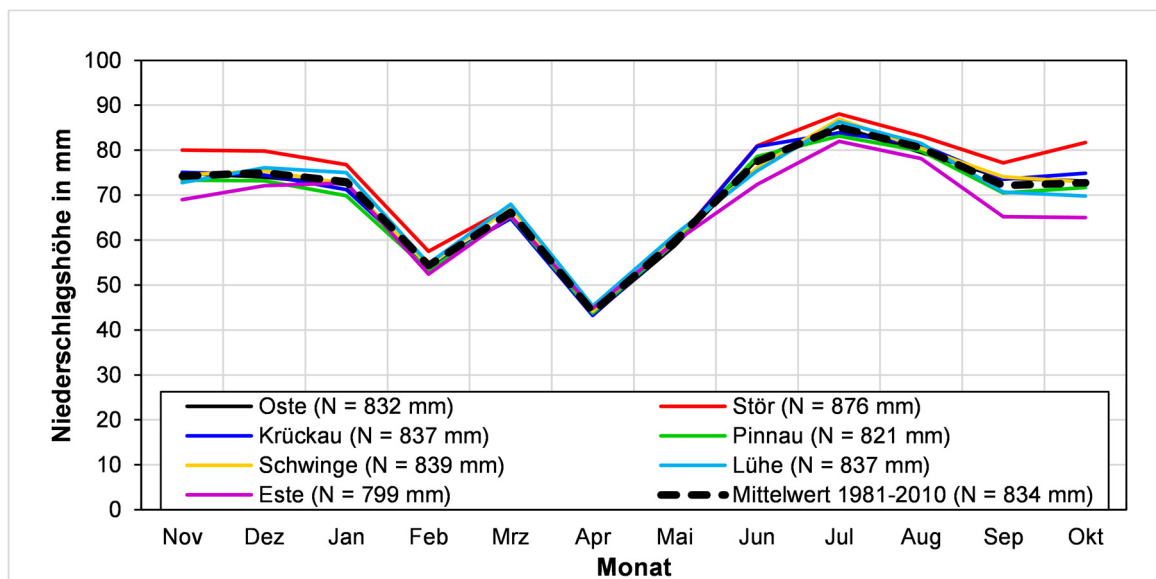
Für wasserwirtschaftliche Planungs- und Bemessungsaufgaben werden die Zeitreihen statistisch ausgewertet. Dies erfolgt zum einen in Form von langjährigen Mittelwerten, z.B. als MNQ, MQ, MHQ, und zum anderen in Form von Hochwasserabflüssen bestimmter Wiederkehrintervalle, wie z.B. als HQ<sub>10</sub>, HQ<sub>100</sub>. Letztere werden mittels extremwertstatistischer Verfahren ermittelt. Richtlinien für das Vorgehen bei der Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten sind u.a. in (DVWK 1999) und (DWA 2012) beschrieben.

### **Niederschlag**

Zur Beurteilung des Abflussverhaltens von Flüssen ist zunächst der Gebietsniederschlag von Interesse. Niederschlagsdaten werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in aufbereiteter plausibilisierter Form zur Verfügung gestellt. Unter anderem stehen monatliche und jährliche Größen des Niederschlags für Deutschland in einer Auflösung von 1x1 km zur Verfügung. Die mittleren Jahresgänge des Niederschlags im Zeitraum 1981-2010 wurden für jedes Einzugsgebiet separat ausgewertet (Abbildung 48). Grundsätzlich ähneln sich die Jahresgänge in den einzelnen Einzugsgebieten, was aufgrund der räumlichen Nähe zueinander auch zu erwarten ist. Die feuchtesten Monate sind Juli, August und Juni, die trockensten Monate sind April, Februar und Mai.

Innerhalb des Kollektivs der Einzugsgebiete ist die Bandbreite der Niederschlagssumme in den Monaten März, April und Mai am geringsten ( $\Delta N < 5$  mm) und im September und Oktober am größten ( $\Delta N \approx 15$  mm). Die Bandbreite des Kollektivs wird im Wesentlichen durch zwei Graphen bestimmt. Nach oben wird das Kollektiv durch den Jahresgang des Niederschlags über dem Einzugsgebiet der Stör begrenzt, nach unten im Wesentlichen durch den Jahresgang über dem Einzugsgebiet der Este. Insgesamt ergibt sich die größte Niederschlagssumme für das Einzugsgebiet der Stör ( $N = 876$  mm) und die geringste Niederschlagssumme für das Einzugsgebiet der Este ( $N = 799$  mm).

Tendenziell ist eine Abnahme der Niederschlagssummen von West nach Ost und von Nord nach Süd erkennbar. Die Unterschiede in den Niederschlagssummen sind im Wesentlichen auf höhere Niederschläge in den Herbst- und Wintermonaten zurückzuführen.



**Abbildung 48: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für die Einzugsgebiete sieben ausgewählter Nebenflüsse der Tidelbe für den Zeitraum 1981-2010 (Daten: DWD)**

Abbildung 49 zeigt das Gebietsmittel des Jahresgangs des Niederschlags für die Zeiträume 1961-1990 und 1981-2010. Da die Datengrundlage für die beiden Zeitscheiben unterschiedlich ist (u.a. die berücksichtigten Messstationen), ist keine absolute Vergleichbarkeit untereinander gegeben. Allerdings handelt es sich bei den dargestellten Graphen um Gebietsmittel eines großen Gebietes. Dementsprechend sind die Informationen vieler Niederschlagsstationen enthalten, wodurch dem nachfolgend dargestellten Vergleich eine gewisse Aussagekraft beigemessen werden kann. In den Monaten Januar bis März ist eine signifikante Zunahme der Niederschlagshöhe im Zeitraum 1981-2010 gegenüber dem Zeitraum 1961-1990 festzustellen. Der einzige Monat, in dem die Niederschlagshöhe geringer wird, ist der April. Dadurch verschiebt sich der trockenste Monat vom Februar (1961-1990) in den April (1981-2010). Der Juli bleibt der feuchteste Monat. Die Jahressumme für den Zeitraum 1961-1990 beträgt  $N = 778$  mm und die Jahressumme für den Zeitraum 1991-2010 beträgt  $N = 834$  mm, woraus sich eine deutliche Differenz von  $\Delta N = 56$  mm (rd. 7%) ergibt. Auch bei fehlender absoluter Vergleichbarkeit, können die Erkenntnisse als Indizien für eine Zunahme der Jahressumme sowie für feuchter werdende Winter gewertet werden.

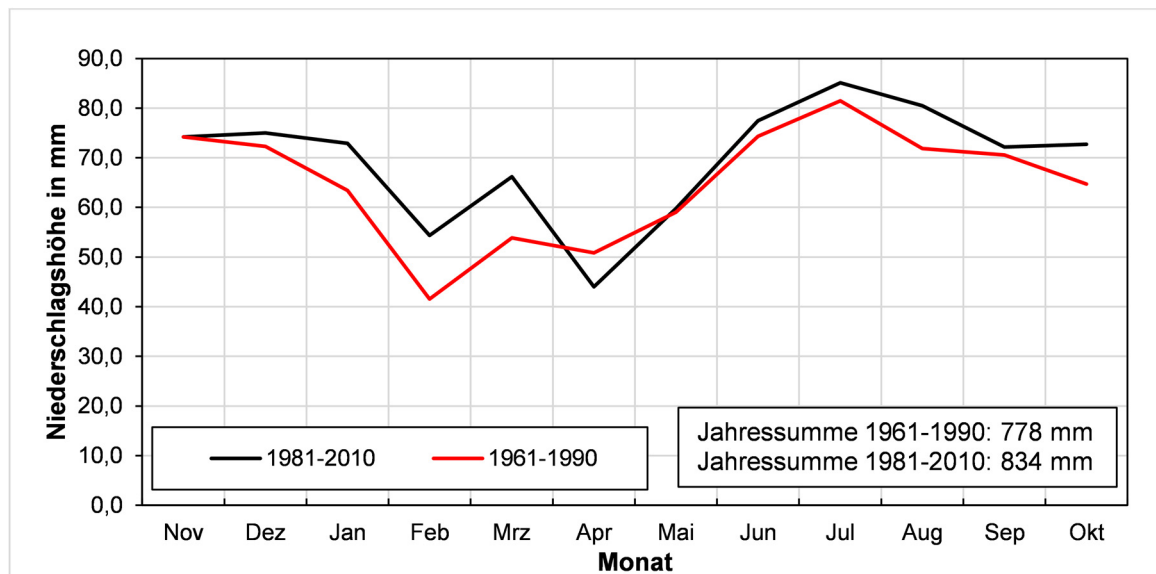


Abbildung 49: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags gemittelt über die Einzugsgebiete sieben ausgewählter Nebenflüsse der Tideeibe für zwei unterschiedliche Zeitscheiben (Daten: DWD)

### Stammdaten der betrachteten Pegel

Im Folgenden wird das Abflussverhalten der Nebenflüsse auf der Grundlage von gemessenen Pegeldaten beschrieben. Langjährige Mittelwerte von Pegeldaten werden u.a. in gewässerkundlichen Jahrbüchern veröffentlicht (FFH und HPA 1990-2014). Tabelle 12 zeigt eine Zusammenstellung von langjährigen Mittelwerten für ausgewählte Nebenflusspegel stromauf der Tidegrenze. Außerdem sind für jeden Pegel die relevanten Pegelstammdaten, wie z.B. Größe des Pegelinzugsgebietes ( $A_{\text{EPegel}}$ ) und des Gesamteinzugsgebietes ( $A_{\text{EZG}}$ ) dargestellt.

Tabelle 12: Pegelstammdaten und Niederschlag für ausgewählte Nebenfluss-Pegel stromauf der Tidegrenze (Daten: FFH und HPA 1990-2014, LLUR Flintbek, NLWKN Stade)

Fluss	Pegel	AE Pegel	AE Pegel / AE EZG	MNQ	MQ	MHQ	HQ	Datum HQ	MNq	MHq	Hq	Zeit-raum	N
	-	km <sup>2</sup>	-	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s		l / (s km <sup>2</sup> )	l / (s km <sup>2</sup> )	l / (s km <sup>2</sup> )	-	mm
Oste	Rockstedt	611	0,36	1,87	6,35	39,6	113	22.01. 08	3,1	10,4	185	1961-2012	832
Stör	Willenscharen	476	0,27	2,18	5,89	28,2	45,4	26.02. 02	4,6	12,4	95	1972-2012	876
Krückau	A23	129	0,47	0,29	1,29	9,31	14,9	08.12. 07	2,2	10,0	116	1996-2013	837
Pinnau	Renzel	73,3	0,20	0,24	0,85	6,53	9,18	19.07. 02	3,3	11,6	125	1972-2012	822
Schwinge	Schwinge	61,1	0,28	0,21	0,72	3,22	9,67	19.07. 02	3,5	11,8	158	1978-2014	839
Aue/Lühe	Oersdorf	28,1	0,13	0,07	0,34	3,77	7,98	18.07. 02	2,4	11,9	284	1983-2012	837
Este	Emmen	184	0,51	1,05	1,78	8,08	24,3	19.07. 02	5,7	9,7	132	1957-2012	799
Mittel									3,5	11,1	156		834

Die Pegel befinden sich in der Regel nicht unmittelbar an der Tidegrenze, sondern einige Kilometer weiter stromauf, so dass das jeweilige Pegelinzugsgebiet nur einen gewissen Anteil des

Gesamteinzugsgebietes repräsentiert. Dieser repräsentative Anteil variiert bei den betrachteten Pegeln zwischen 0,13 (Oersdorf/Lühe) und 0,51 (Emmen/Este). Der Pegel Oersdorf weist zudem mit Abstand das kleinste Einzugsgebiet ( $A_E = 28,1 \text{ km}^2$ ) auf. Das größte Einzugsgebiet hat der Pegel Rockstedt an der Oste ( $A_E = 611 \text{ km}^2$ ). Der Größe der Einzugsgebiete entsprechend weisen diese beiden Pegel im Vergleich zu den anderen Nebenflusspegeln die kleinsten bzw. größten absoluten Abflüsse für MNQ, MQ, MHQ und HQ auf. Eine Gemeinsamkeit von vier der sieben Flüsse ist das Datum des höchsten Abflussereignisses (HQ). Das Niederschlagsereignis am 18./19.07.2002, das in Norddeutschland flächendeckend zu großen Überschwemmungen führte, verursachte auch an der Pinnau, der Schwinge, der Aue/Lühe und der Este den höchsten gemessenen Abfluss. An den drei übrigen Flüssen führten Niederschlagsereignisse in den Wintermonaten zu den höchsten Abflüssen.

Zum Vergleich der hydrologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete eignen sich insbesondere die spezifischen Abflüsse, die in  $\text{l/s/km}^2$  angegeben werden. Anhand des spezifischen mittleren Niedrigwasserabflusses lassen sich Rückschlüsse auf den Basisabfluss der Flüsse ziehen. Die Krückau weist mit  $\text{MNq} = 2,2 \text{ l/s/km}^2$  den kleinsten Basisabfluss auf, die Este mit  $\text{MNq} = 5,7 \text{ l/s/km}^2$  den größten. Den geringsten spezifischen mittleren Hochwasserabfluss weist die Este mit  $\text{MHq} = 9,7 \text{ l/s/km}^2$  auf, was u.a. für ein großes Speichervolumen des Einzugsgebietes oder für geringere hochwasserhervorrufende Niederschlagsereignisse spricht. Die Stör weist den höchsten spezifischen mittleren Hochwasserabfluss ( $\text{MHq} = 12,4 \text{ l/s/km}^2$ ) auf, was durch ein vergleichsweise geringes Speichervolumen oder höhere Niederschlagsereignisse bedingt sein kann.

Den mit Abstand größten spezifischen Höchstabfluss weist die Lühe am Pegel Oersdorf mit einem Hq von  $284 \text{ l/s/km}^2$  auf. Dieser hohe Wert ist vor allem der geringen Größe des Einzugsgebietes geschuldet. Da in kleinen Einzugsgebieten die Abflussbildung und die Abflusskonzentration nicht von den gleichen Prozessen dominiert werden wie in größeren Gebieten, können lokale Gebietspezifika einen großen Einfluss auf die Abflusskennwerte haben (u.a. Spreafico 2003). Bei Betrachtung der übrigen Pegel, die weitaus größere Einzugsgebiete haben, fällt auf, dass die Oste mit einem Hq von  $185 \text{ l/s/km}^2$  den größten spezifischen Höchstabfluss hat und die Stör mit einem Hq von  $95 \text{ l/s/km}^2$  den kleinsten.

Der Vergleich der mittleren Hochwasserabflüsse mit den Niederschlagssummen über den Einzugsgebieten zeigt, dass die Stör sowohl die höchsten Niederschläge als auch das größte MHq aufweist. Die Este weist das kleinste MHq auf, was mit der geringsten Niederschlagssumme korrespondiert. Dieser denkbare Zusammenhang kann anhand der übrigen Flüsse jedoch nicht bestätigt werden. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die Jahressumme des Niederschlags nicht zwangsläufig mit der Intensität von intensiven Niederschlagsereignissen korrespondiert, d.h. hohe Niederschlagssummen bedingen nicht zwangsläufig auch besonders intensive Niederschlagsereignisse.

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse einer detaillierten statistischen Auswertung der verfügbaren Zeitreihen des Abflusses am Pegel Emmen/Este und am Pegel A23/Krückau dargestellt. Zunächst werden Zeitreihen des mittleren Tagesabflusses ausgewertet. Am Pegel Emmen/Este reicht die Zeitreihe bis 1956 zurück, am Pegel A23/Krückau bis 1995. Anschließend werden für dieselben Zeiträume Jahresmaxima ausgewertet. Alle Zeitreihen weisen keine signifikanten Trends auf, weshalb auf eine Trendbereinigung verzichtet wurde.

### Variabilität des Abflusses

Die Abflussganglinien in Abbildung 50 verdeutlichen die große Variabilität des Abflusses an beiden Pegeln. Grundsätzlich ist der Abfluss am Pegel Emmen etwas höher, was im Wesentlichen auf das größere Einzugsgebiet und den deutlich größeren Basisabfluss zurückzuführen ist. Der Abfluss der Krückau nimmt in Trockenphasen stark ab. In der Este ist auch eine leichte Abnahme erkennbar, die aber nicht so ausgeprägt ist wie in der Krückau. Die Ausschläge der Ganglinie treten fast zeitgleich auf, obwohl die Schwerpunkte der Einzugsgebiete gut 40 km weit auseinanderliegen. Dies deutet darauf hin, dass die für die Abflussbildung relevanten Rahmenbedingungen, wie Niederschlag, Verdunstung, Versickerung etc., grundsätzlich miteinander vergleichbar sind.

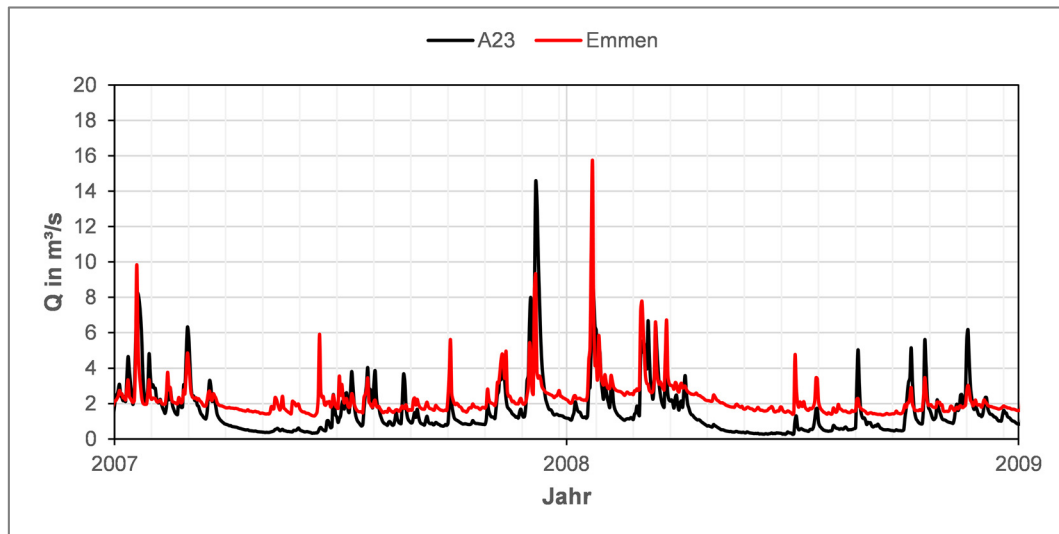


Abbildung 50: Mittlere Tagesabflüsse an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau, (Daten: NLWKN, LKN-SH)

### Dauerlinien des Abflusses

Die Abflussdauerlinien in Abbildung 51 stellen die Überschreitungshäufigkeit klassierter Abflüsse für den Betrachtungszeitraum 1995-2014 dar. Vom Kurvenanstieg einer Dauerlinie kann auf die Abflussvariabilität geschlossen werden. Der über weite Strecken nahezu konstante Verlauf der Dauerlinie der Abflüsse am Pegel Emmen/Este deutet auf eine geringe Abflussvariabilität hin. Eine geringe Abflussvariabilität resultiert u.a. aus einem hohen Basisabfluss und einer hohen Speicherkapazität des Einzugsgebietes. Die Dauerlinie der Abflüsse am Pegel A23/ Krückau weist im Vergleich einen deutlichen Kurvenanstieg auf, was auf eine größere Abflussvariabilität schließen lässt. Der mittlere Abfluss (MQ) am Pegel Emmen beträgt  $1,77 \text{ m}^3/\text{s}$  und am Pegel A23  $1,24 \text{ m}^3/\text{s}$ .

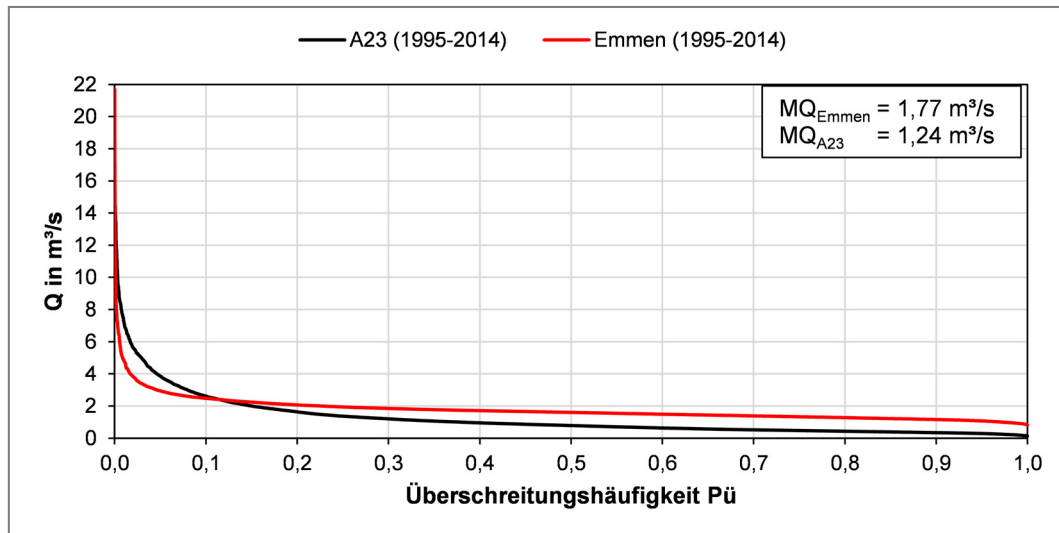


Abbildung 51: Abflussdauerlinien an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau, (Daten: NLWKN, LKN-SH)

### Jahresgang des Abflusses

Abbildung 52 zeigt die Jahresgänge des Abflusses an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau. Es fällt auf, dass die Krückau einen deutlich ausgeprägten Jahresgang aufweist, der zwischen rd. 2,1 m<sup>3</sup>/s im Februar und rd. 0,65 m<sup>3</sup>/s im Juni schwankt. Der Abfluss in der Este schwankt lediglich zwischen rd. 2,2 m<sup>3</sup>/s im Februar und rd. 1,5 m<sup>3</sup>/s im Juni. Damit bestätigen die Jahresgänge die Erkenntnis aus der Analyse der Dauerlinien, dass der Abfluss am Pegel A23 eine größere Variabilität hat als der Abfluss am Pegel Emmen. An beiden Pegeln sind die Monate April bis Oktober deutlich trockener als die übrigen Monate. Die Jahresgänge des Abflusses ähneln dem des Niederschlags (Abbildung 49) nur zum Teil, was vor allem auf die Evapotranspiration zurückzuführen ist. Die hohe Verdunstung von Pflanzen-, Boden- und Wasseroberflächen ist vor allem durch die höheren Temperaturen und den Pflanzenstand in den Sommermonaten deutlich höher. Dies führt dazu, dass der September, der den niederschlagsreichsten Monat darstellt, zu den Monaten mit dem geringsten Abfluss gehört. Vergleichbares gilt auch für den Mai und den August, die tendenziell feuchtere Monate sind.

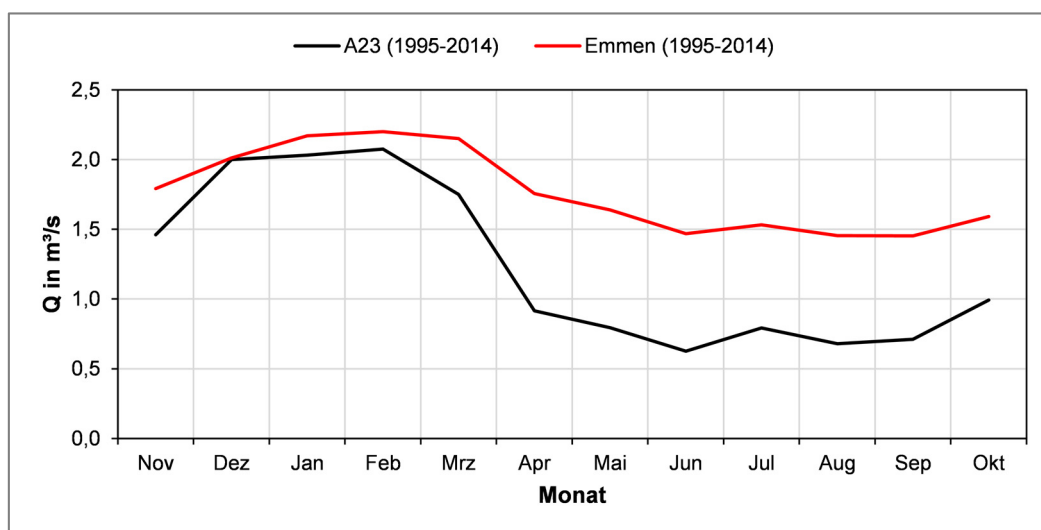
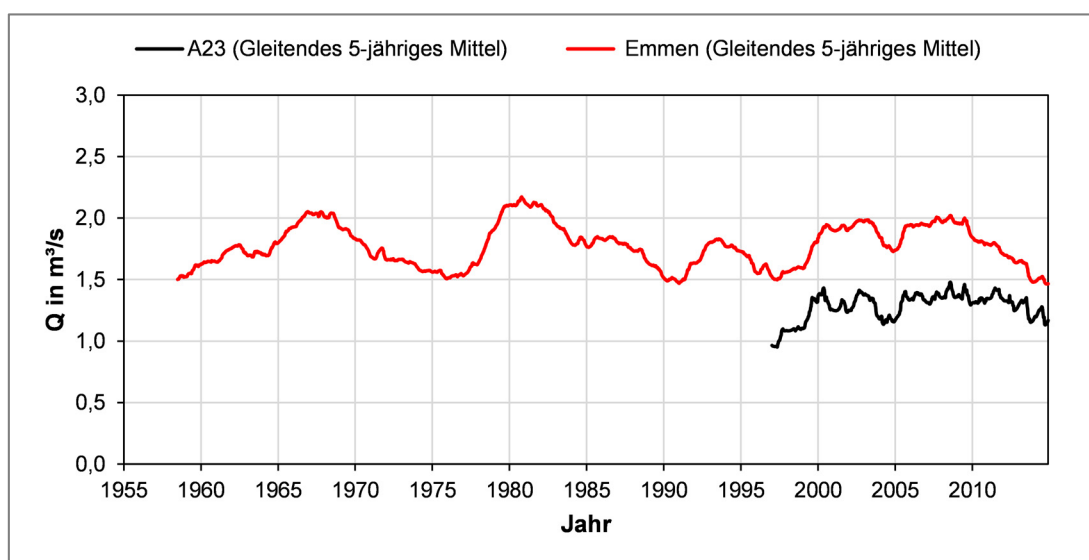


Abbildung 52: Jahresgang des Abflusses an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau, (Daten: NLWKN, LKN-SH)

### Langjähriges Abflussgeschehen

Bei der Betrachtung von statistischen Größen, wie z.B. Mittelwerten, hat die Länge der betrachteten Zeitreihe eine große Bedeutung. Im Fall einer langen Zeitreihe, wie z.B. der am Pegel Emmen/Este, ist der Einfluss der multidekadischen Variabilität gering. Im Fall einer kurzen Zeitreihe, wie der am Pegel A23/Krückau, kann der Einfluss deutlich größer sein. Aus diesem Grund ist es sinnvoll zu überprüfen, wie viele Zyklen der multidekadischen Variabilität in den Zeitreihen enthalten sind und ob derzeit eine besonders trockene oder eine besonders feuchte Phase vorherrscht.

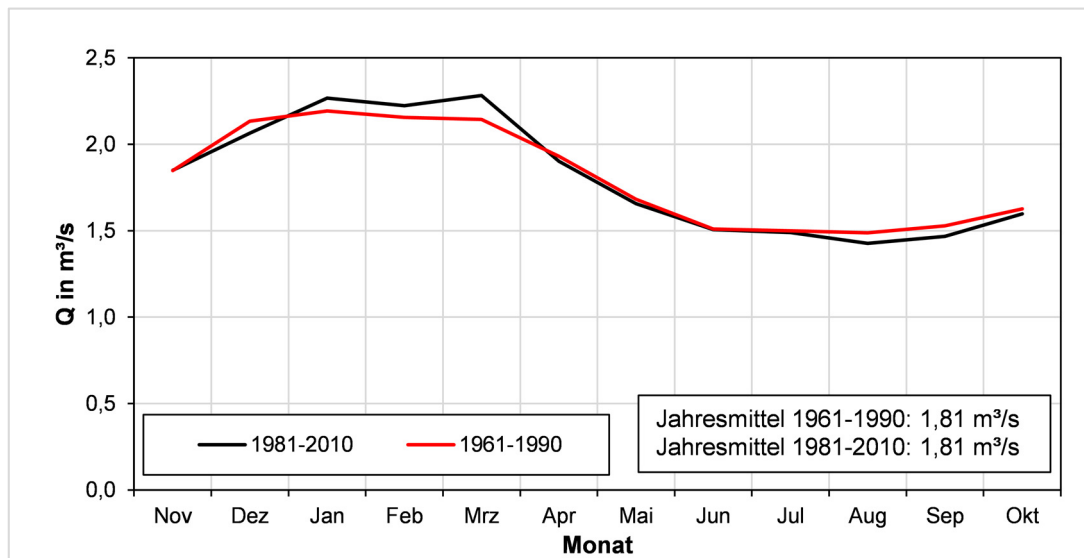
In Abbildung 53 sind die gleitenden fünfjährigen Mittelwerte des Abflusses an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau dargestellt. Bei der Betrachtung sind Schwankungen mit einer Periodendauer zwischen fünf und fünfzehn Jahren zu erkennen. Diese periodischen Schwankungen zeigen an beiden Pegeln einen sehr ähnlichen Verlauf. Sie spiegeln die multidekadische Variabilität des Klimas wieder. Bei der kürzeren Zeitreihe des Pegels A23/Krückau wird deutlich, dass diese zwei komplette Zyklen umfasst, weshalb nur von einer geringen Beeinflussung der Mittelwerte durch die multidekadische Variabilität ausgegangen werden kann.



**Abbildung 53: Ganglinien des Mittelwerts für die Pegel Emmen/Este und A23/Krückau, (Daten: NLWKN, LKN-SH)**

Zu Beginn des Abschnittes wurden in den Jahressgängen des mittleren Gebietsniederschlags für die Zeiträume 1961-1990 und 1981-2010 Indizien für Veränderungen im Jahresgang über die Zeit gefunden. In der Tendenz nehmen die Niederschlagshöhen im Winter zu, wodurch die Jahressumme ebenfalls zunimmt (vgl. Abbildung 49). Nun soll die Zeitreihe des Abflusses am Pegel Emmen auf ähnliche Veränderungen untersucht werden. In Abbildung 54 sind die mittleren Jahressgänge für die beiden gleichen Zeiträume dargestellt. Darin ist ein leichter Anstieg des Abflusses in den Monaten Januar, Februar und März zu erkennen, also genau die Monate, in denen auch eine deutliche Zunahme der Niederschlagshöhen festgestellt wurde. In den Sommermonaten August und September sowie im Dezember hat der mittlere Abfluss hingegen leicht abgenommen. Gerade die Abnahme des Abflusses im September steht im Gegensatz zur Zunahme der Niederschlagshöhe. Ein Grund hierfür kann eine

ebenfalls höher gewordene Evapotranspiration in den Sommermonaten sein, welche die Zunahme der Niederschlagshöhe mehr als kompensiert.

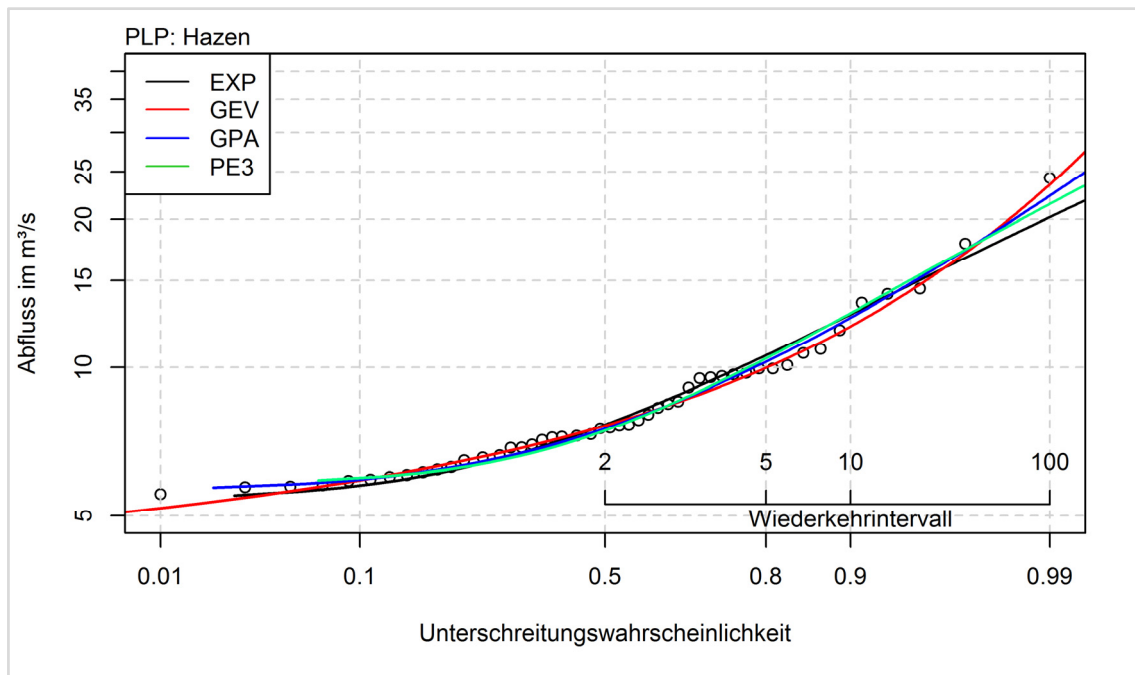


**Abbildung 54: Mittlerer Jahresgang des Abflusses am Pegel Emmen/Este für die Zeiträume 1961-1990 und 1981-2010, (Daten: NLWKN)**

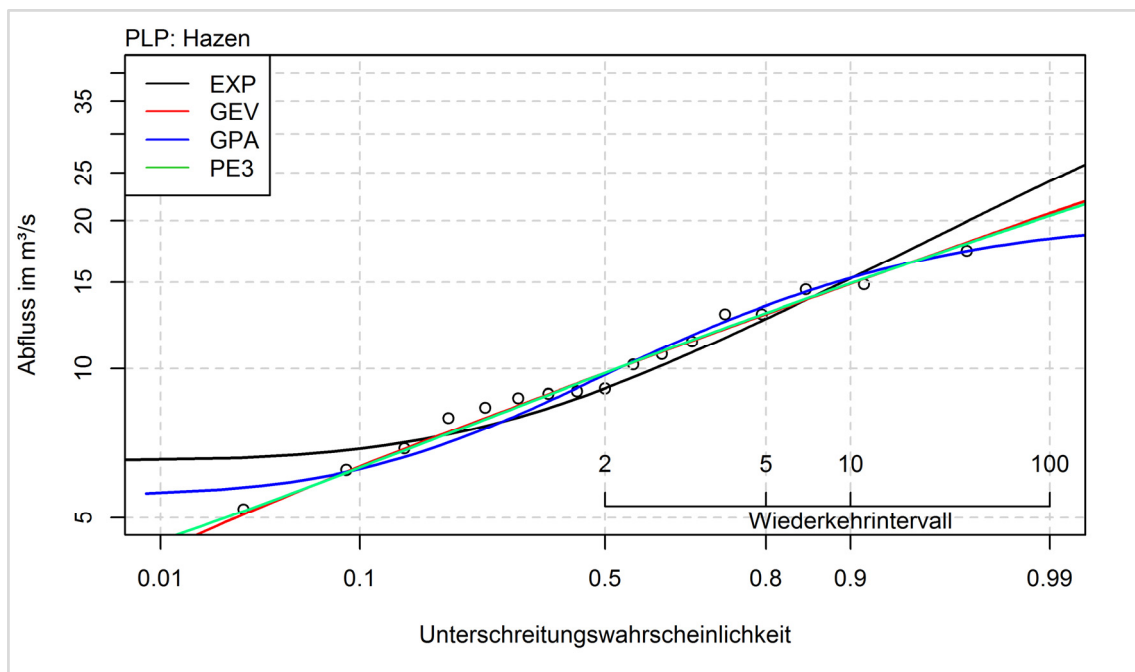
### Hochwasserabflüsse

Neben den Tagesmittelwerten werden für beide Pegel auch Zeitreihen der Maxima der hydrologischen Jahre ausgewertet. Beiden Zeitreihen liegen den folgenden statistischen Auswertungen als Stichproben zugrunde. An beide Stichproben sind unterschiedliche Extremwertverteilungen angepasst worden (Exponential-Verteilung (EXP), Gamma-Verteilung, Allgemeine Extremwertverteilung (GEV), Generalisierte Pareto-Verteilung (GPA), Generalisierte Normalverteilung, Gumbel-Verteilung, Lognormal-Verteilung, Log-Pearson3-Verteilung (PE3), Weibull-Verteilung). In Abbildung 55 und Abbildung 56 sind die Anpassungen ausgewählter Extremwertverteilungen dargestellt. Die Anpassung erfolgte mit Hilfe der Methode der L-Momente. Zur Beurteilung der Güte der Anpassung sind die Stichproben dargestellt. Dafür wurden die plotting positions nach Hazen und nach Weibull untersucht. In beiden Fällen wurde die GEV als beste Anpassung ausgewählt.

Die Länge der Zeitreihen spielt bei der Auswertung von Zeitreihen mittels extremwertstatistischer Verfahren eine große Rolle. Ist die Zeitreihe sehr kurz, können einzelne vergleichsweise extreme Werte zur Anpassung einer schlecht konditionierten Verteilungsfunktion führen. Der Vergleich der Anpassungen in Abbildung 56 und Abbildung 55 zeigt eine deutlich bessere Anpassung für die Stichprobe am Pegel Emmen. Eine Empfehlung lautet, dass die Länge der zugrundeliegenden Zeitreihe mindestens ein Drittel des zu bestimmenden Wiederkehrintervalls betragen sollte (DWA 2012; DVWK 1999). Demzufolge ist z.B. zur Bestimmung des  $HQ_{100}$  eine Zeitreihe von mindestens 33 Jahren erforderlich. Die Länge der Zeitreihe am Pegel Emmen ist mit 58 Jahren also ausreichend zur Bestimmung des  $HQ_{100}$ . Die Länge der Zeitreihe am Pegel A23 ist mit 17 Jahren hingegen nicht ausreichend für die zuverlässige Bestimmung des  $HQ_{100}$ . Der für das  $HQ_{100}$  ermittelte Wert ist daher als Anhaltswert zu betrachten.



**Abbildung 55: Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen an die Stichprobe der Jahresmaxima am Pegel Emmen/Este**



**Abbildung 56: Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen an die Stichprobe der Jahresmaxima am Pegel A23/Krückau**

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse für Abflüsse ausgewählter Wiederkehrintervalle zusammengefasst. Für das  $HQ_2$ ,  $HQ_5$  und das  $HQ_{10}$  ergibt die statistische Auswertung für den Pegel A23 größere Werte als für den Pegel Emmen. Für das  $HQ_{100}$  ergibt die Auswertung für den Pegel Emmen den größeren Abfluss. Dabei ist beim  $HQ_{100}$  am Pegel A23 die genannte Einschränkung zu beachten.

**Tabelle 13: Abflüsse ausgewählter Wiederkehrintervalle für die Pegel Emmen/Este und A23/Krückkau, Verteilungsfunktion GEV**

	HQ <sub>2</sub>	HQ <sub>5</sub>	HQ <sub>10</sub>	HQ <sub>100</sub>	Stichprobenumfang
Pegel/Fluss	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	a
Emmen/Este	7,61	9,98	12,12	23,56	58
A23/Krückkau	9,81	12,92	14,90	20,72 <sup>14</sup>	17

#### 4.2.2.2 Abflüsse in den Unterläufen

Im Bereich der Marsch gelangen Niederschlags- und Grundwasser über ein künstliches Entwässerungssystem aus Grüppen, Wettern und Kanälen in die Nebenflüsse. Die Entwässerung durch die Hochwasserschutzlinie erfolgt über Siele und Schöpfwerke. Aufgrund der geringen Geländehöhen und der Tideverhältnisse erfolgt die Entwässerung der Marschen zumeist im Schöpfwerksbetrieb (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Schon allein aufgrund der geringeren Durchlässigkeit der Böden und den hohen Grundwasserständen ist im Bereich der Marsch von einem höheren Direktabfluss auszugehen als im Bereich der Einzugsgebiete der Oberläufe. Außerdem sind die meisten Acker- und Grünlandflächen mit Drainagerohren ausgestattet, welche die Entwässerung der Flächen beschleunigen.

Der Betrieb der Schöpfwerke erfolgt nach Bedarf, wobei die Betriebszeiten in den meisten Fällen nicht erfasst werden. Die mangelnde Datengrundlage lässt eine genauere Analyse der Abflüsse nicht zu. Allerdings ist die nominelle Förderleistung der Schöpfwerkspumpen bekannt, die herangezogen werden kann, um einen Eindruck über die Abflussmengen zu erhalten, die potentiell in die Unterläufe der Nebenflüsse eingeleitet werden können. Bei dieser Betrachtung ist zu beachten, dass jede Pumpe ihre nominelle Förderleistung nur bei bestimmten (Wasserstands-) Verhältnissen erreicht und die Leistungsfähigkeit von Pumpen mit zunehmendem Alter aufgrund von Abnutzungen zurückgeht. Aufgrund der tidebedingt schwankenden Außenwasserstände und des teilweise hohen Pumpenalters ist davon auszugehen, dass die effektive Förderleistung der Schöpfwerkspumpen geringer ist und die Betrachtung der nominellen Fördermengen somit auf der sicheren Seite liegt.

Die wesentlichen Grunddaten der Entwässerungsstruktur in den Einzugsgebieten der Unterläufe sind in Tabelle 14 zusammengestellt. Die mit Abstand meisten Schöpfwerksstandorte ( $n = 44$ ) und die größte nominelle Fördermenge ( $Q_{\text{nom}} = 105 \text{ m}^3/\text{s}$ ) weist die Oste auf, die gleichzeitig mit  $431 \text{ km}^2$  auch mit Abstand das größte Einzugsgebiet mit Geländehöhen kleiner als  $3 \text{ m ü. NHN}$  entwässert. Im Verhältnis ergibt sich eine flächenbezogene nominelle Förderleistung von  $q_{\text{nom}} = 245 \text{ l/s/km}^2$ . Dieser Wert entspricht in etwa dem Mittelwert aller Nebenflüsse. Die Este ( $q_{\text{nom}} = 355 \text{ l/s/km}^2$ ) und die Krückkau ( $q_{\text{nom}} = 300 \text{ l/s/km}^2$ ) fallen durch eine verhältnismäßig hohe flächenbezogene Förderleistung auf, während die Schwinde ( $q_{\text{nom}} = 122 \text{ l/s/km}^2$ ), Stör ( $q_{\text{nom}} = 131 \text{ l/s/km}^2$ ) und Pinnau ( $q_{\text{nom}} = 166 \text{ l/s/km}^2$ ) eine verhältnismäßig niedrige flächenbezogene Förderleistung aufweisen.

Gründe für die teilweise großen Unterschiede sind nicht direkt ersichtlich, da naheliegende Vermutungen, wie die nachfolgend beschriebenen, nicht zutreffen. Die Vermutung, dass im Fall von besonders tiefliegenden Flächen eine hohe Förderleistung vorgehalten wird, trifft nicht in jeden Fall

<sup>14</sup> Die von DVWK 1999 empfohlene maximale Extrapolation auf das dreifache der Länge der gemessenen Zeitreihe wird überschritten.

zu. Die geringsten Geländehöhen kommen an der Stör vor, wo aber auch die nominelle Förderleistung ( $q_{\text{nom}} = 131 \text{ l/s/km}^2$ ) deutlich unter dem Durchschnitt liegt ( $q_{\text{nom}} = 216 \text{ l/s/km}^2$ ). An der Krückau, wo die Geländehöhen ebenfalls sehr gering sind, ist die Förderleistung hingegen sehr hoch ( $q_{\text{nom}} = 300 \text{ l/s/km}^2$ ). Auch die Vermutung, dass im Bereich des intensiv genutzten Alten Landes aufgrund der sensiblen Obstbäume eine hohe Förderleistung vorgehalten wird, trifft nur bedingt zu. An der Este ist die Förderleistung zwar sehr hoch ( $q_{\text{nom}} = 355 \text{ l/s/km}^2$ ), an der Lühe ( $q_{\text{nom}} = 191 \text{ l/s/km}^2$ ) ist sie hingegen unterhalb des Durchschnitts ( $q_{\text{nom}} = 216 \text{ l/s/km}^2$ ). Auf detailliertere Untersuchungen zur Identifikation möglicher Gründe wird an dieser Stelle verzichtet.

**Tabelle 14: Hydrologische Grunddaten zur Entwässerung an den Unterläufen ausgewählter Nebenflüsse (Zusammenstellung Stadelmann 2010 und Angaben der Entwässerungsverbände)**

Fluss	Anzahl Schöpfwerksstandorte n	Nominelle Gesamt-Förderleistung $Q_{\text{nom}}$	Einzugsgebiet < 3 m ü. NN $A_E$	flächenbezogene nominelle Förderleistung $q_{\text{nom}}$
	-	$\text{m}^3/\text{s}$	$\text{km}^2$	$\text{l/s/km}^2$
Oste	44	105,4	431	245
Stör	23	40,1	307	131
Krückau	4	20,1	67	300
Pinnau	2	4,8	29	166
Schwinge	2	6,7	55	122
Lühe	5	8,8	46	191
Este	8	13,5	38	355
Mittelwert	Summe 88	Summe 199,4	Summe 973	Mittel 216

Vergleicht man nun die flächenbezogenen nominellen Förderleistungen  $q_{\text{nom}}$  mit den spezifischen Höchstabflüssen ( $H_q$ ) der Pegel in den Oberläufen (Tabelle 12), fällt auf, dass erstgenannte erwartungsgemäß deutlich größer sind. Die einzige Ausnahme davon stellt die Schwinge dar. Eine mögliche Ursache (kleines Pegelinzugsgebiet) wurde bereits genannt.

Die sehr hohen flächenbezogenen nominellen Förderleistungen im Bereich der Marsch ergeben aus mehreren Gründen Sinn. Zum einen ist der Direktabfluss von den Marschflächen wie eingangs erläutert höher. Zum anderen ist das Bestreben groß, lokale Überflutungen im Bereich landwirtschaftlicher Flächen zu vermeiden, da die meisten Anbaufrüchte auch auf kurze Einstauzeiten sehr sensibel reagieren. Im Fall von Obstbäumen ist beispielsweise bereits bei einem kurzen Einstau außerhalb der Vegetationsperiode der Totalverlust der Pflanzen wahrscheinlich (Tiemann 2012).

Vergleicht man die absolute Förderleistung  $Q_{\text{nom}}$  mit den statistischen Abflüssen der Pegel an den Oberläufen (Tabelle 13), fällt auf, dass  $Q_{\text{nom}}$  der Schöpfwerke im Unterlauf der Este der Größenordnung eines  $HQ_{10}$  am Pegel Emmen entspricht. An der Krückau liegt  $Q_{\text{nom}}$  sogar in der Größenordnung des  $HQ_{100}$  am Pegel A23. Die maximale Leistungsfähigkeit spielt vor allem bei der Ermittlung des Bemessungswasserstandes eine Rolle, da der Anstieg des Wasserstandes bei geschlossenem Sperrwerk massiv vom Zufluss beeinflusst wird.

Im Folgenden werden die Abflüsse in den beiden Fokusgewässern Este und Krückau näher analysiert. Hierfür werden Simulationsergebnisse der hydrodynamisch-numerischen Modelle der Krückau und der Este ausgewertet. Mit beiden Modellen wurde je ein gut zweiwöchiger Zeitraum (genau 28 Tiden) simuliert, bei dem mittlere Verhältnisse vorherrschten, d.h. mittlere Abflüsse in den Nebenflüssen und der Elbe mit keinem nennenswerten Windstau in der Elbe ( $M_{\text{Thw}} \pm 0,3 \text{ m}$ ).

Abbildung 57 und Abbildung 58 zeigen den zeitlichen Verlauf des Abflusses an ausgewählten Stationen in den Unterläufen. Der Abfluss hat bei Ebbstrom ( $Q_{\text{Ebb}}$ ) ein positives Vorzeichen und bei Flutstrom ( $Q_{\text{Flut}}$ ) ein negatives. Zunächst werden die Abflusskurven im Bereich der Mündungssperrwerke betrachtet (schwarze Graphen). Korrespondierend dazu stellen die gestrichelten Graphen den Wasserstand im Bereich der Mündungssperrwerke dar. Für beide Flüsse zeigen die Abflusskurven bei Ebbstrom einen vergleichbaren Verlauf. Der maximale Abfluss bei Ebbstrom  $Q_{\text{Ebb}}$  stellt sich eine Stunde nach dem Flutstromkenterpunkt ein und nimmt anschließend kontinuierlich bis zum Ebbstromkenterpunkt ab. Insgesamt ist die Ebbstromdauer an der Este rund eine Stunde länger als an der Krückau.

Die Verläufe der Abflusskurven bei Flutstrom weisen für beide Flüsse unterschiedliche Charakteristiken auf. In der Krückau gewinnt der Abfluss mit einsetzender Flut schnell an Größe und erreicht nach rund einer Stunde sein Maximum. Auf diesem hohen Niveau bleibt der Abfluss über einen längeren Zeitraum von etwa 3,5 h und nimmt dann innerhalb der verbleibenden 1,5 h bis zur erneuten Flutstromkenterung ab. In der Este gewinnt der Abfluss mit einsetzender Flut ebenfalls schnell an Größe, verzeichnet nach einer knappen Stunde allerdings einen leichten Rückgang, um dann wieder anzusteigen und zur Mitte der Flutstromdauer sein Maximum zu erreichen. Anschließend nimmt der Abfluss in den verbleibenden 2,5 h bis zur erneuten Flutstromkenterung wieder ab. Die Abnahme ist zunächst nur gering, mit kürzer werdendem Abstand zur Flutstromkenterung wird die Abnahme jedoch immer stärker.

Die für die Mündungsbereiche beschriebenen Verläufe der Abflusskurven werden beim Durchlaufen der Nebenflüsse in Richtung Tidegrenze gedämpft, bleiben in ihrer Form aber grundsätzlich erhalten. Innerhalb der ersten zwei bis drei Fließkilometer werden die Maxima bereits deutlich reduziert. Im Fall der Este halbieren sich die Abflüsse, im Fall der Krückau werden die Abflüsse noch deutlicher reduziert auf rund ein Drittel. Dieser Unterschied ist auf die Topographie der Flüsse zurückzuführen. Im Fall der Krückau wird ein Teil des Abflusses außerdem vom Prielsystem aufgenommen.

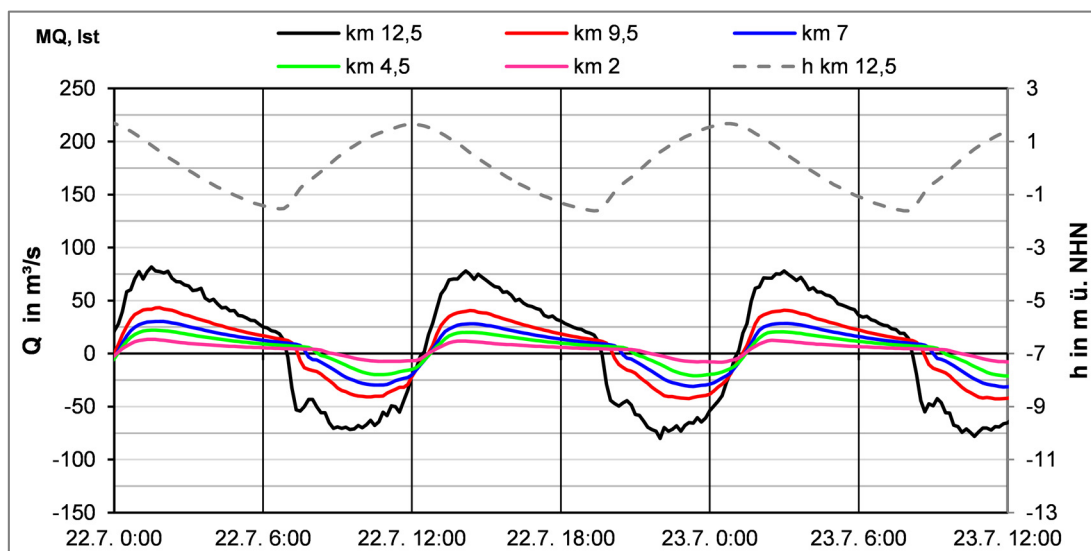


Abbildung 57: Abflüsse an ausgewählten Stationen im Unterlauf der Este

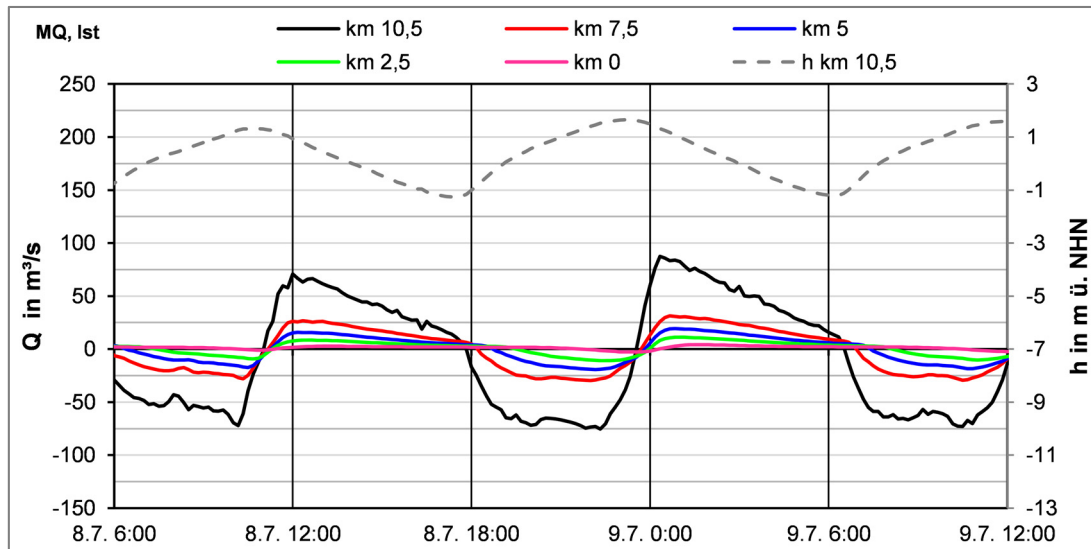


Abbildung 58: Abflüsse an ausgewählten Stationen im Unterlauf der Krückau

Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen die Entwicklung der Scheitelwerte der Abflusskurven im Längsschnitt. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der Abflüsse  $Q_{\text{Ebb}}$  und  $Q_{\text{Flut}}$  sowie die Bandbreiten, die innerhalb des ausgewerteten Zeitraumes aufgetreten sind. An den Bandbreiten werden die Auswirkungen der Tide auf den Abfluss deutlich. Höher auflaufende Tiden rufen größere Abflüsse sowohl bei Ebb- als auch bei Flutstrom hervor. Beachtlich ist jedoch, dass bereits moderat variierende Wasserstände ( $M_{\text{Thw}} \pm 0,3 \text{ m}$ ) sehr große Schwankungen im Abfluss hervorrufen. Im Mündungsbereich der Krückau, d.h. in den unteren drei Fließkilometern, sind die Bandbreiten insgesamt größer ( $Q_{\text{Ebb}} = 70 - 135 \text{ m}^3/\text{s}$ , Mittelwert der Ebbe =  $95 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{\text{Flut}} = 65 - 125 \text{ m}^3/\text{s}$ , Mittelwert der Flut =  $85 \text{ m}^3/\text{s}$ ) als im Mündungsbereich der Este ( $Q_{\text{Ebb}} = 75 - 100 \text{ m}^3/\text{s}$ , Mittelwert der Ebbe =  $85 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{\text{Flut}} = 70 - 105 \text{ m}^3/\text{s}$ , Mittelwert der Flut =  $85 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Im restlichen Bereich sind die Abflussbandbreiten in der Este größer als in der Krückau. Insgesamt erinnert der Verlauf der Graphen  $Q_{\text{Flut}}$  und  $Q_{\text{Ebb}}$  sowohl in Abbildung 60 als auch in Abbildung 59 an einen Trichter. Nahe der Mündung sind die Abflüsse am größten und nehmen in Richtung Oberstrom ab. Im Bereich der Tidegrenze ist  $Q_{\text{Flut}}$  gleich null und  $Q_{\text{Ebb}}$  entspricht dem Binnenabfluss.

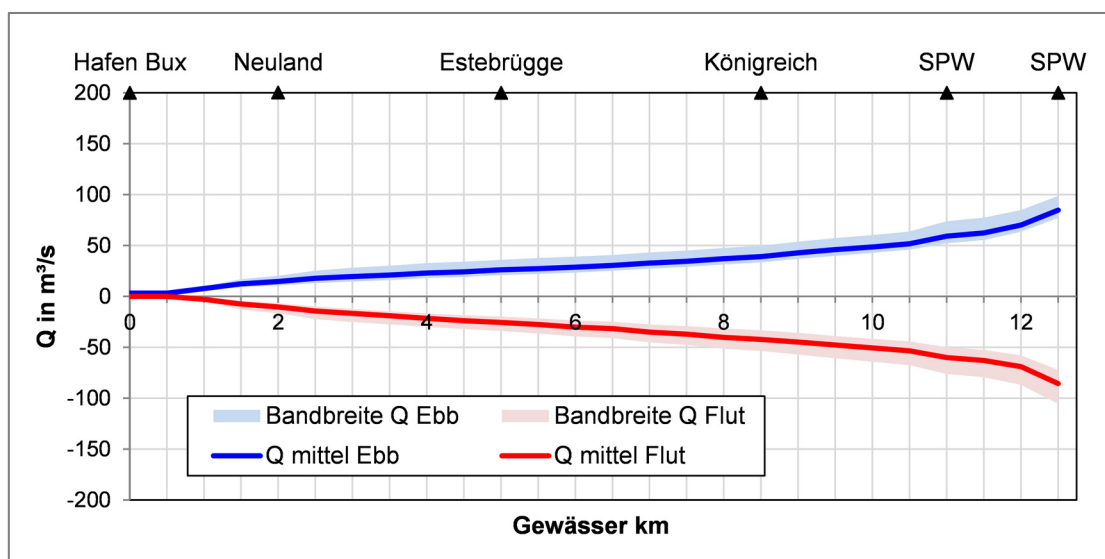
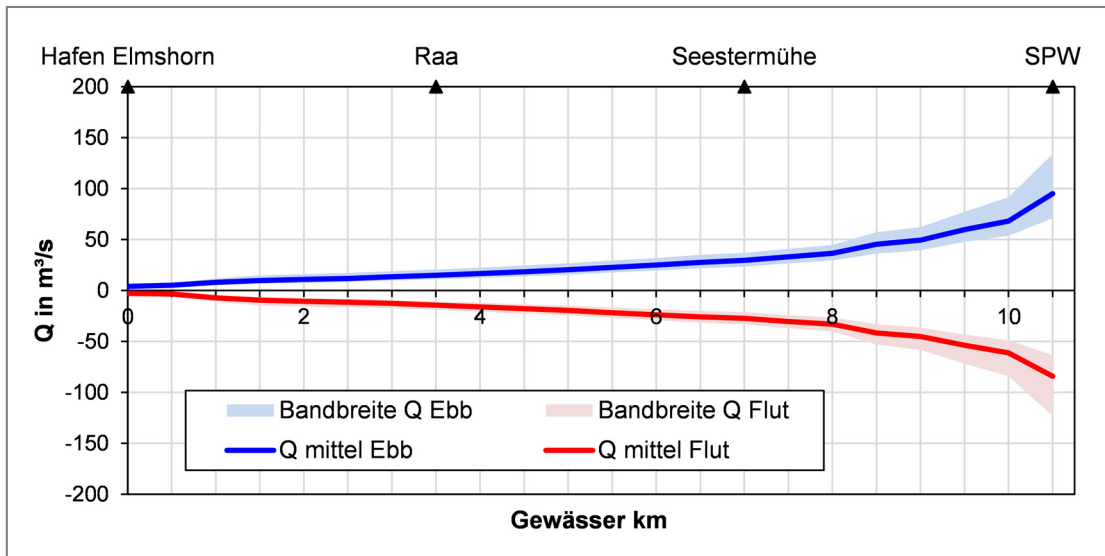
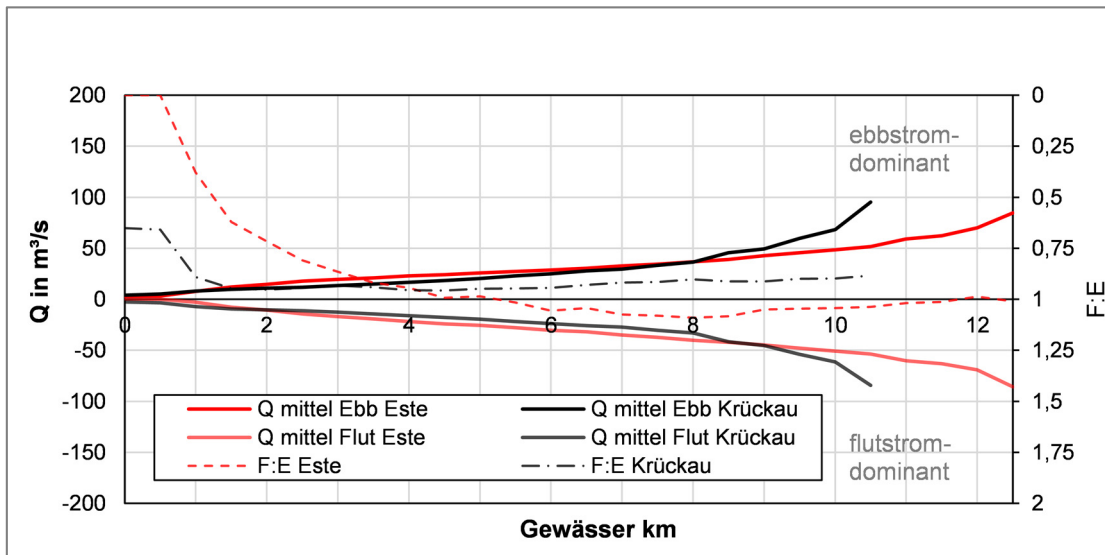


Abbildung 59: Abflüsse im Unterlauf der Este bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)



**Abbildung 60: Abflüsse im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)**

Durch direkte Gegenüberstellung in Abbildung 61 werden Unterschiede zwischen der Este und der Krückau deutlich. Beginnend an der Mündung ist die Abnahme des Abflusses in Richtung Oberstrom in der Krückau deutlich ausgeprägter. Weiter in Richtung Oberstrom wird die Abnahme mit jedem Fließkilometer zunehmend geringer. In der Este ist die Abnahme im Mündungsbereich weniger deutlich ausgeprägt.  $Q_{Ebb}$  und  $Q_{Flut}$  sind bis etwa zwei Kilometer stromab der Tidegrenze auf einem vergleichsweise hohen Niveau und fallen dann in Richtung Tidegrenze deutlich ab. Das Verhältnis  $Q_{Flut} / Q_{Ebb}$  zeigt den dominierenden Part. Während im gesamten Unterlauf der Krückau der Ebbstrom dominiert, verfügt die Este über einen etwa sechs Kilometer langen Abschnitt (km 5 – km 11) mit Flutstromdominanz.



**Abbildung 61: Vergleich der Abflüsse in den Unterläufen von Este und Krückau**

### 4.2.2.3 Wasserstände in den Unterläufen

Die Wasserstände in den Unterläufen werden im Wesentlichen durch die Gezeiten geprägt. Weitere Einflussfaktoren sind der Oberwasserzufluss, der Eintrag über die Schöpfwerke und der Betrieb der Sperrwerke. Im Fall hoher Oberwasserabflüsse wird der Wasserstand stromab der Tidegrenze angehoben. Mit zunehmender Entfernung von der Tidegrenze nimmt der Einfluss des Oberwassers ab. Ähnliches gilt auch für den Zufluss über die Schöpfwerke. Je kürzer die Entfernung zur Mündung, desto geringer ist der Einfluss auf den Wasserstand.

Ab Wasserständen von etwa einem halben Meter über dem mittleren Hochwasser werden die Mündungssperrwerke geschlossen, wodurch der Binnenwasserstand signifikant beeinflusst wird. Durch die Sperrung während des Flutstromes wird ein Absperrunk von wenigen Dezimetern erzeugt, der sich in Richtung stromauf ausbreitet und an Untiefen sowie senkrechten Wänden reflektiert wird. Der ausgespiegelte Wasserstand (Ruhewasserstand) liegt einige Dezimeter unter dem Schließwasserstand. Das Wasserspiegelgefälle zwischen Tidegrenze und geschlossenem Sperrwerk beträgt während einer Sperrung wenige Zentimeter.

An nahezu allen Sperrwerken findet ein regelmäßiger Spülbetrieb statt. Je nach Konstruktionsart der Tore werden diese bei ablaufendem oder auflaufendem Wasser teilweise geschlossen, um höhere Fließgeschwindigkeiten im Sperrwerksbereich zu erzeugen, die einen Teil des dort sedimentierten Materials erodieren. An einigen Nebenflüssen, wie z.B. der Krückau, finden außerdem gelegentlich Schließungen für kulturelle Zwecke (u.a. Hafenfeste) statt. Die Schließungen erfolgen zum Zeitpunkt des Tidehochwassers, wodurch kein nennenswerter Schwall oder Sunk entsteht.

Alle genannten Betriebsarten haben einen mehr oder weniger großen Einfluss auf den binnenseitigen Wasserstand, wodurch die dort aufgezeichneten Zeitreihen des Wasserstandes grundsätzlich beeinflusst sind. Aus diesem Grund werden die Tidekennwerte, die an nahegelegenen Elbe-Pegeln ermittelt wurden, herangezogen (vgl. Abschnitt 3.3.1.3). Im Folgenden wird die Entwicklung der mittleren Wasserstände in den Unterläufen der beiden Fokusgewässer Este und Krückau beschrieben. Analog zu den Abflüssen in den Unterläufen (Abschnitt 4.2.2.2) werden hierfür die bereits eingeführten Simulationsergebnisse der hydrodynamisch-numerischen Modelle der Krückau und der Este (28 Tide, mittlere Verhältnisse) ausgewertet.

Der zeitliche Verlauf des Wasserstandes an ausgewählten Stationen in den Unterläufen von Este und Krückau ist in Abbildung 62 und Abbildung 63 dargestellt. Die schwarzen Graphen stellen den Wasserstandsverlauf an den Mündungssperrwerken dar. Der prinzipielle Verlauf der Kurven in der Este und der Krückau ist ähnlich. Bei genauer Betrachtung fallen jedoch auch Unterschiede auf. Die Flutstromdauer beträgt an der Este rund 5,0 h und an der Krückau etwa 5,5 h. Dementsprechend beträgt die Ebbstromdauer an der Este knapp 7,5 h und an der Krückau knapp 7,0 h. Der Tidehub beträgt an der Este gut dreieinhalb Meter und an der Krückau rund drei Meter. Durch die kürzere Flutstromdauer und den größeren Tidehub steigt der Wasserstand in der Este bei Flut deutlich schneller an. Besonders auffällig ist der sehr steile Anstieg innerhalb der ersten Stunde nach Tnw. In der anschließenden Stunde ist ein deutlicher Knick im Verlauf erkennbar. Der Anstieg des Wasserstandes verlangsamt sich vorübergehend. Anschließend folgt wieder ein beschleunigter Anstieg. Dieser besondere Verlauf im Wasserstand führt zum der in Abschnitt 4.2.2.2 beschriebenen vorübergehenden Abnahme des Abflusses. Diese Charakteristik ist im Wasserstandsverlauf der Krückau nicht erkennbar und somit offensichtlich typisch für die Este.

In beiden Flüssen werden die Wasserstandskurven beim Durchlaufen in Richtung Oberstrom verformt. Der beschriebene Knick im Verlauf des Wasserstandes in der Este bleibt erhalten, wird jedoch in Richtung Stromauf zunehmend abgeschwächt. Insgesamt erfahren die Ganglinien an beiden Flüssen in Richtung Stromauf eine Stauchung, die aus dem Anstieg des Tnw resultiert. Das Thw sowie die Steigung des Flutastes verändern sich nur geringfügig. Die Steigung des Ebbastes wird mit höher werdendem Tnw geringer. Außerdem verschieben sich die Eintrittszeiten von Thw und Tnw gegenüber der Mündung. An beiden Flüssen tritt das Thw im Bereich der Tidegrenze rund eine Stunde später ein als an der Mündung. Im Gegensatz dazu zeigt sich beim Tnw an beiden Flüssen ein unterschiedlicher Zeitversatz. In der Este beträgt der Zeitversatz zwischen Mündungssperrwerk (km 12,5) und km 2,0 etwa 1,5 h. In der Krückau beträgt der Zeitversatz zwischen Mündungssperrwerk (km 10,5) und km 2,0 etwa 2,5 h. Dementsprechend verkürzt sich die Flutstromdauer im Verlauf der Este um eine halbe Stunde auf nunmehr 4,5 h und im Verlauf der Krückau um eineinhalb Stunden auf nunmehr 4,0 h.

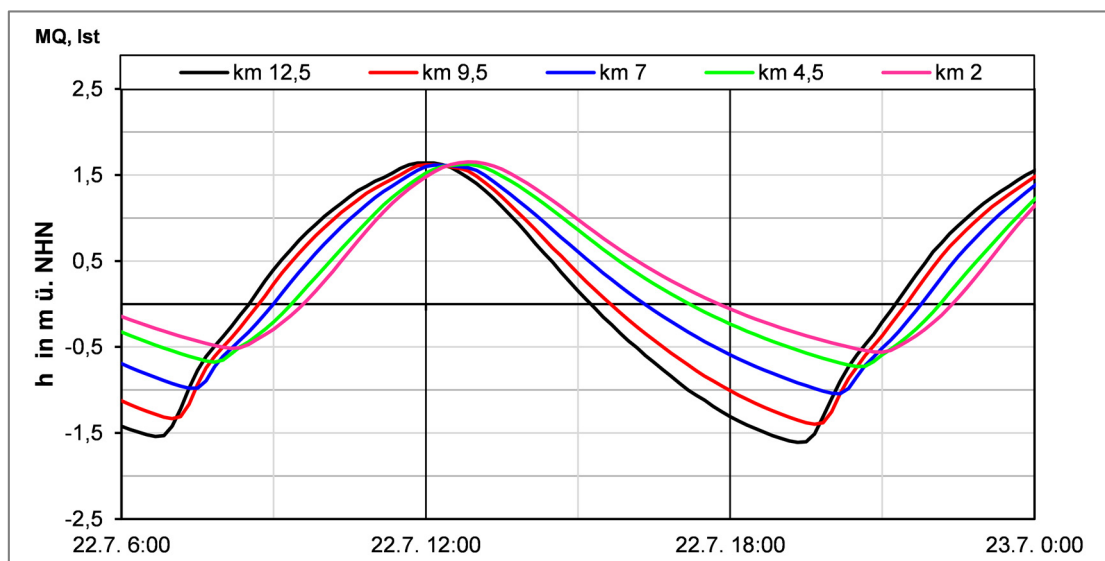


Abbildung 62: Wasserstände bei mittlerem Oberwasserzufluss (MQ) an ausgewählten Stationen im Unterlauf der Este

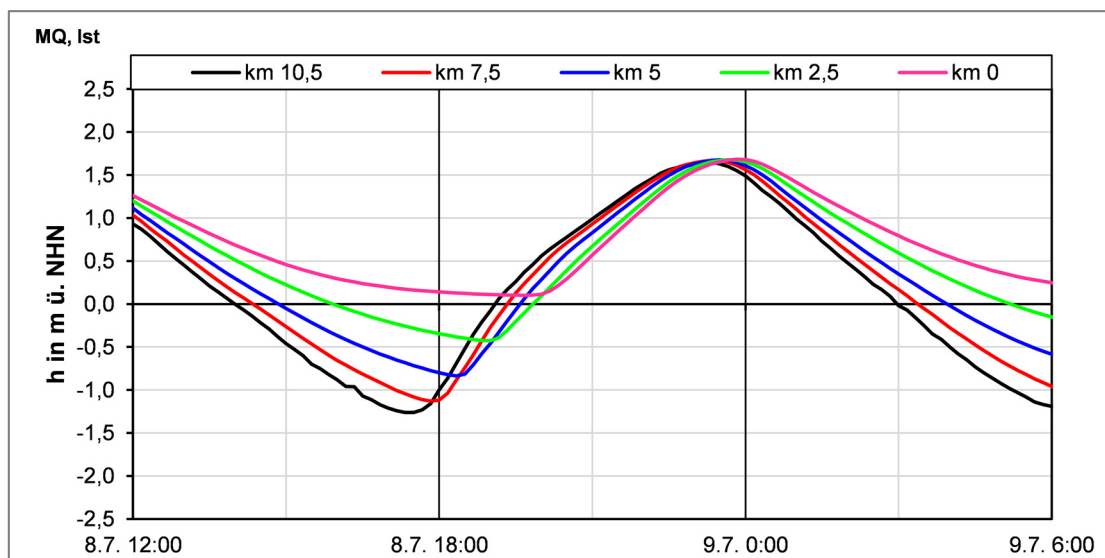


Abbildung 63: Wasserstände bei mittlerem Oberwasserzufluss (MQ) an ausgewählten Stationen im Unterlauf der Krückau

Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen die Entwicklung der Scheitelwerte der Wasserstandskurven im Längsschnitt. Für beide Flüsse ist darin ein leichter Anstieg des Thw um wenige Zentimeter in Richtung Oberstrom zu erkennen. Das Tnw steigt hingegen deutlich an. Allerdings sind im Verlauf Unterschiede zwischen Este und Krückau auszumachen. Der Verlauf des Tnw an der Este weist drei Punkte auf, an denen ein Steigungswechsel erkennbar ist (bei km 10,0, km 5,0 und km 0,5). Der Steigungswechsel bei km 0,5 ist auf den Höhengsprung am Marschtorwehr zurückzuführen. Im tidebeeinflussten Bereich weist der Abschnitt zwischen km 10,0 und km 5,0 die größte Steigung auf. Der Verlauf des Tnw an der Krückau weist ebenfalls drei Punkte auf, an denen ein Steigungswechsel erkennbar ist (bei km 9,0, km 5,5, und km 0,0). Die relative Lage der Punkte ist an beiden Flüssen vergleichbar. Allerdings ist es bei der Krückau nicht wie im Fall der Este der mittlere Abschnitt, der die größte Steigung aufweist, sondern der im Oberstrom gelegene Abschnitt.

Insgesamt steigt das Tnw in der Este zwischen Mündung und Buxtehuder Hafen um rd. 1,0 m auf -0,5 m ü. NHN. Der Tidehub nimmt von knapp 3,5 m auf etwa 2,3 m ab. In der Krückau steigt das Tnw zwischen Mündung und Elmshorner Hafen um 1,5 m auf etwa 0 m ü. NHN an. Der Tidehub nimmt von etwa 3,0 m auf etwa 1,6 m ab. Dabei fällt auf, dass der Tidehub in der Krückau zwischen der Mündung und km 9 nahezu unverändert bleibt.

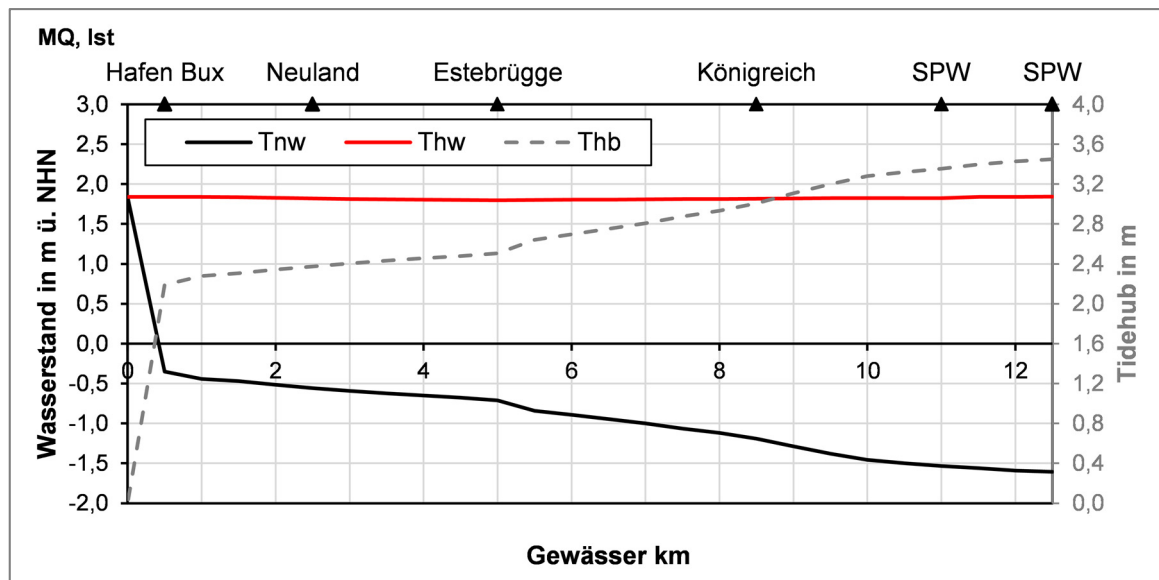


Abbildung 64: Ausgewählte Tidekennwerte des Wasserstands in der Este bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)

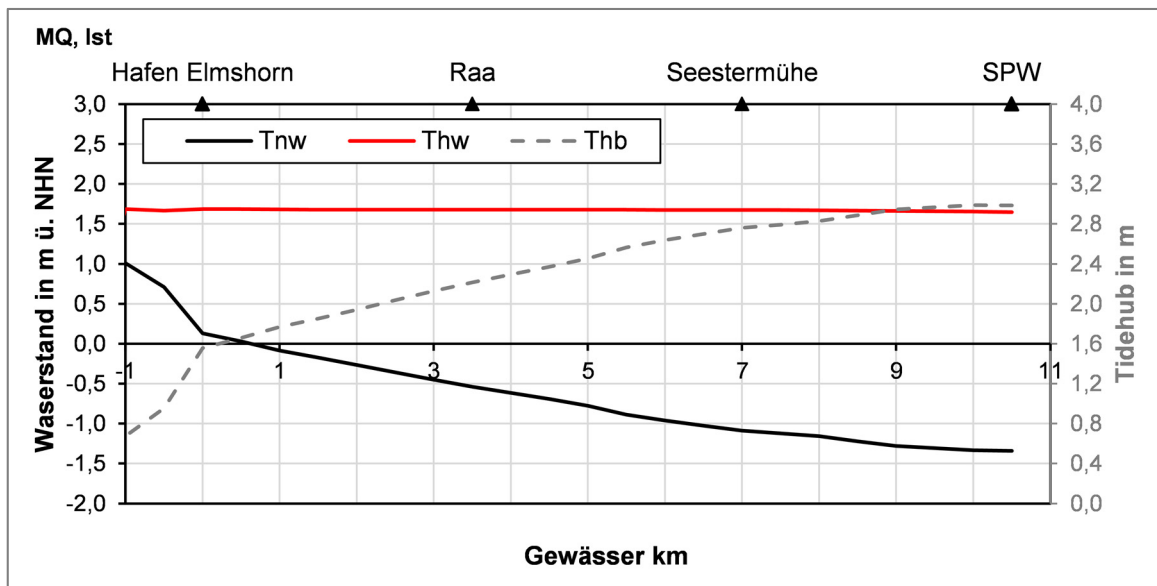


Abbildung 65: Ausgewählte Tidekennwerte des Wasserstands in der Krückau bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)

#### 4.2.2.4 Strömungsverhältnisse

Die Strömungen in den Unterläufen werden im Wesentlichen durch die Gezeiten geprägt. Weitere Einflussfaktoren sind der Oberwasserzufluss, der Eintrag über die Schöpfwerke und der Betrieb der Sperrwerke. Im Fall hoher Oberwasserabflüsse wird die Ebbstromgeschwindigkeit stromab der Tidegrenze angehoben. Mit zunehmender Entfernung von der Tidegrenze nimmt der Einfluss des Oberwassers ab. Ähnliches gilt auch für den Zufluss über die Schöpfwerke. Je kürzer die Entfernung zur Mündung, desto geringer ist der Einfluss auf den Wasserstand. Der Sperrwerksbetrieb kann die Strömungsgeschwindigkeit auf zweierlei Art beeinflussen. Im Fall einer Sperrung gehen die Fließgeschwindigkeiten gegen null. Im Fall des Spülbetriebs werden die Strömungsgeschwindigkeiten im sperrwerksnahen Bereich deutlich erhöht.

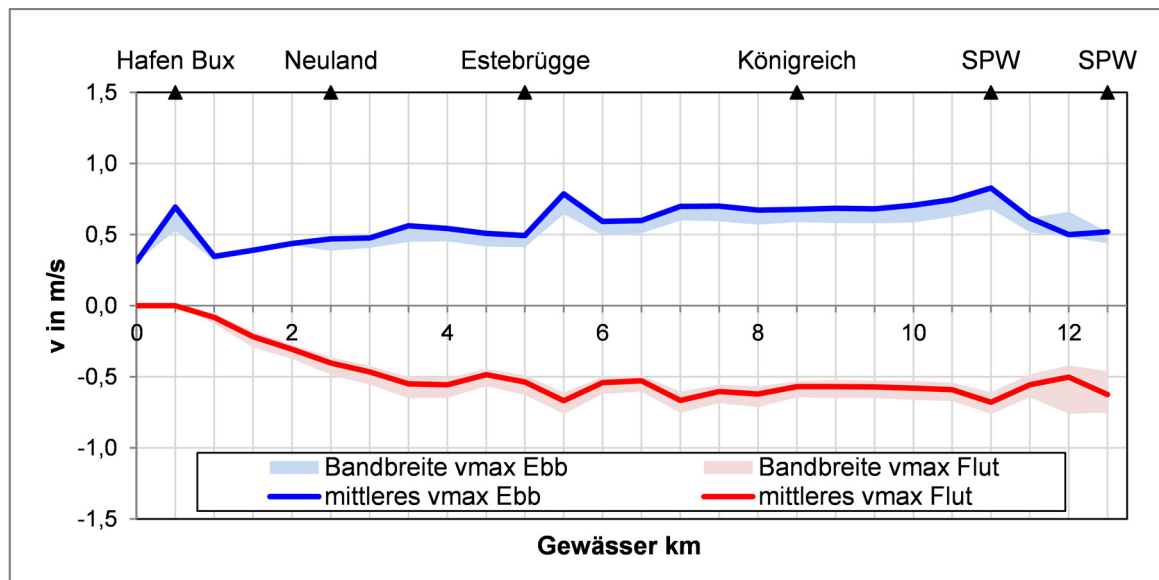
In den Nebenflüssen stehen nur vereinzelt gemessene Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit zur Verfügung. Im Rahmen der Beweissicherung zur Fahrrinnenanpassung wurden einmal pro Jahr für 24 Stunden die Strömungsgeschwindigkeiten an einigen Positionen in den Nebenflüssen gemessen. Aufgrund des geringen Datenumfangs ergibt eine Auswertung dieser Daten keine sinnvollen mittleren Werte. Allerdings wurden die Daten zur Kalibrierung und Validierung der hydrodynamisch-numerischen Modelle verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Im Folgenden wird die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten in den beiden Fokusgewässern Este und Krückau beschrieben. Analog zu den Abflüssen in den Unterläufen (Abschnitt 4.2.2.2) und den Wasserständen (Abschnitt 4.2.2.3) werden hierfür Simulationsergebnisse der hydrodynamisch-numerischen Modelle der Krückau und der Este ausgewertet.

Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen die maximalen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten  $v_{\max}$ , die in den jeweiligen Querprofilen im Simulationszeitraum auftreten. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte von  $v_{\max}$  sowie die zugehörigen Bandbreiten. Aus den maximalen Fließgeschwindigkeiten können u.a. Rückschlüsse auf die angreifenden Schubspannungen gezogen werden. Lokale Einengungen des Profils führen in der Regel zu einem Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit und lokale Aufweitungen zu einem Rückgang der Strömungsgeschwindigkeit. Der Verlauf von  $v_{\max}$  im

Unterlauf der Este zeigt einige Auffälligkeiten. Im Bereich der Mündung beträgt  $v_{\max}$  sowohl bei Ebb- als auch bei Flutstrom im Mittel rund 0,5 m/s und ist damit vergleichsweise klein. Tatsächlich ist das Profil in diesem Bereich stark aufgeweitet. Die Bandbreiten deuten jedoch an, dass die Fließgeschwindigkeiten bei höher auflaufenden Tiden auch deutlich höher sein können. Im Bereich des Inneren Este-Sperrwerks (km 11,0) ist sowohl bei Ebb- als auch bei Flutstrom ein lokales Maximum mit  $v_{\max} = 0,75$  m/s auszumachen, was auf die Einschnürung des Profils zurückzuführen ist. Die geringe Bandbreite deutet darauf hin, dass  $v_{\max}$  diese Größenordnung während nahezu jeder Tide erreicht.

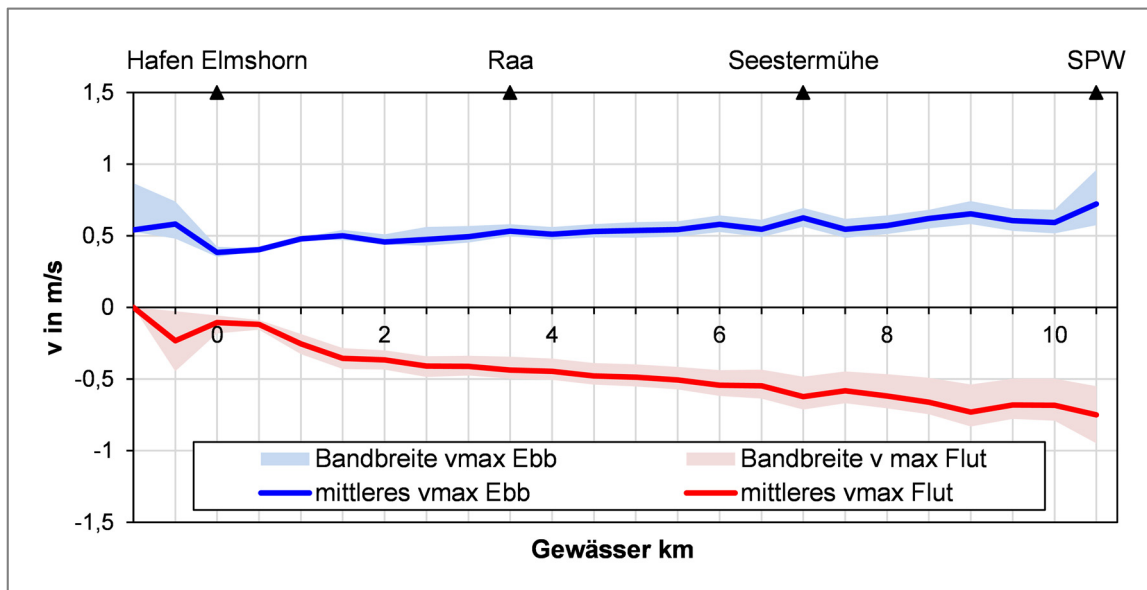
Zwischen km 10,0 und km 7,0 ist der Verlauf beider Kurven vergleichsweise konstant ( $v_{\max} = 0,6$  m/s). Zwischen km 6,5 und km 6,0 ist ein lokales Minimum erkennbar ( $v_{\max} = 0,5$  m/s) und im Bereich der Einschnürung bei km 5,5 (Estebrücke) wieder ein lokales Maximum ( $v_{\max} = 0,6$  m/s). Zwischen Estebrücke und dem Buxtehuder Hafen ist die maximale Ebbstromgeschwindigkeit vergleichsweise konstant ( $v_{\max} = 0,5$  m/s). Die maximale Flutstromgeschwindigkeit verläuft hingegen nur zwischen Estebrücke und km 3,5 konstant und nimmt dann deutlich ab. Im Buxtehuder Hafen ist die Flutstromgeschwindigkeit gleich null, was auf die feste Tidegrenze bei km 0,5 zurückzuführen ist. Der Vergleich der Bandbreiten bei Ebb- und Flutstrom zeigt eine etwas größere Variabilität bei Flutstrom.



**Abbildung 66: Strömungsgeschwindigkeiten im Unterlauf der Este bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)**

Auch der Verlauf von  $v_{\max}$  im Unterlauf der Krückau zeigt einige Auffälligkeiten. Im Gegensatz zur Este wird die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des Inneren Este-Sperrwerks erreicht. Im Mittel beträgt  $v_{\max} \approx 0,75$  m/s. Im Fall von etwas höheren Tiden werden fast 1,0 m/s erreicht. Auf den gesamten Unterlauf bezogen ist die Bandbreite im Bereich des Sperrwerks, wie auch an der Este, am größten. In Richtung des Elmshorner Hafens nimmt  $v_{\max}$  sowohl bei Ebb- als auch bei Flutstrom konstant ab. Bei km 9,0 und km 7,0 fallen zwei kleine lokale Maxima auf. Zwischen km 1,5 und dem Elmshorner Hafen (km 0,0) geht die maximale Flutstromgeschwindigkeit deutlich von 0,35 m/s auf unter 0,1 m/s zurück. Zwischen dem Hafen und km -1,0 steigt  $v_{\max}$  in beiden Stromrichtungen wieder leicht an, was auf die starke Einengung des Profils in diesem Abschnitt zurückzuführen ist. Der Vergleich der Bandbreiten bei Ebb- und Flutstrom zeigt eine deutlich größere Variabilität bei Flutstrom, die in Richtung stromauf jedoch leicht abnimmt. Prinzipiell sind die wesentlichen

Erkenntnisse für die Krückau mit den Ausführungen in (Donner 2014) vergleichbar. Eine exakte Übereinstimmung kann aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen<sup>15</sup> nicht erzielt werden.



**Abbildung 67: Strömungsgeschwindigkeiten im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)**

Die direkte Gegenüberstellung in Abbildung 68 zeigt die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Verläufe der Fließgeschwindigkeiten in Este und Krückau. Abgesehen von wenigen kleineren Abweichungen, die durch lokale Maxima hervorgerufen werden, ähneln sich die Verläufe der maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten in beiden Flüssen. In den Verläufen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten werden Unterschiede deutlich. Im Bereich der Mündungen ist die Fließgeschwindigkeit in der Krückau höher als in der Este. Allerdings ist die Abnahme von  $v_{\max, \text{Flut}}$  in Richtung stromauf in der Krückau deutlich stärker als in der Este. Etwa ab der Hälfte der Fließstrecke ist das  $v_{\max, \text{Flut}}$  der Este größer.

Das Verhältnis  $v_{\max, \text{Ebb}} / v_{\max, \text{Flut}}$  zeigt den dominierenden Part. Bei der Gegenüberstellung der Verhältnisse an Este und Krückau zeigen sich deutliche Unterschiede. In der Krückau dominiert in den unteren drei Fließkilometern zwischen Mündungssperrwerk und km 7,0 die Flutstromgeschwindigkeit. Bei km 7,0 kehrt sich das Verhältnis zugunsten des Ebbstroms um. Die Ebbstromdominanz wird in Richtung stromauf zunehmend größer. Im unmittelbaren Mündungsbereich der Este dominiert ebenfalls die Flutstromgeschwindigkeit. Ab km 11,5 kehrt sich das Verhältnis zugunsten des Ebbstroms um. Die Ebbstromgeschwindigkeit überwiegt zwischen km 11,5 und km 8,0. Im anschließenden Abschnitt zwischen km 8,0 und km 6,0 ist das Verhältnis in etwa unentschieden bevor es wieder zugunsten der Flutstromgeschwindigkeit kippt. Zwischen km 5,5 und km 2,5 ist eine deutliche Flutstromdominanz auszumachen. Bei km 2,5 kippt das Verhältnis abermals zugunsten des Ebbstromes.

<sup>15</sup> Wasserstand am unteren Modellrand und Zufluss am oberen Modellrand

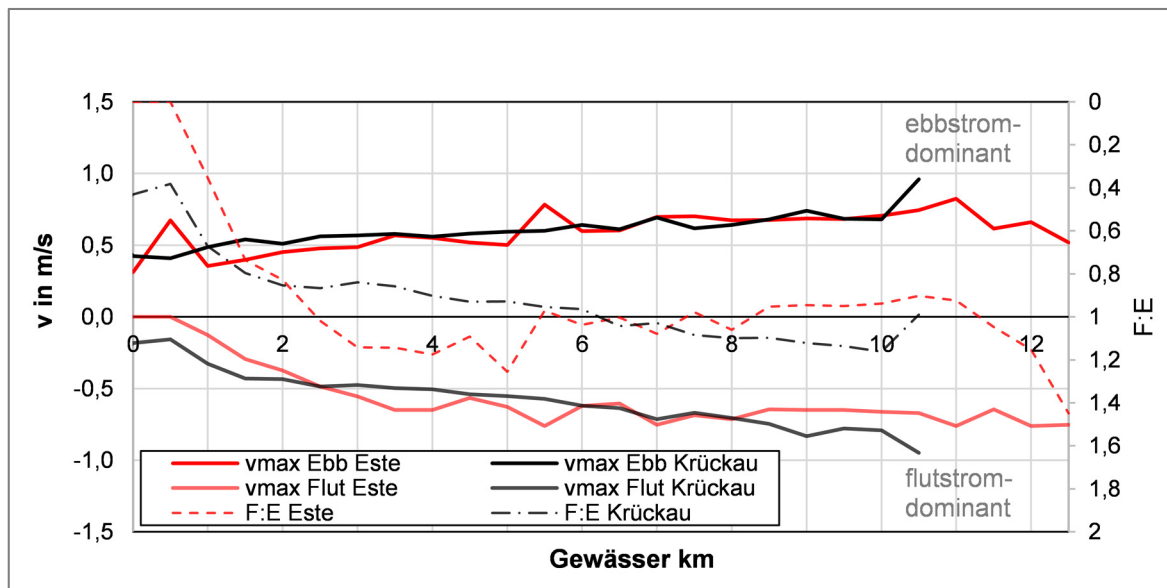


Abbildung 68: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten in den Unterläufen von Este und Krückau

### 4.3 Statistische Auswertung und Einordnung seltener Schließereignisse

Ziel der nachfolgend dargestellten Untersuchungen ist es, Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit seltener Ereignisse zu treffen, die zu hohen Wasserständen auf der Binnenseite der Sperrwerke führen. Die Ergebnisse dienen u.a. als Eingangsgröße einer Risikoanalyse. In den Unterläufen der Nebenflüsse, die mit einem Mündungssperrwerk versehen sind, werden hohe Wasserstände durch den Aufstau des Binnenabflusses bei geschlossenem Sperrwerk hervorgerufen. Die Höhe des Wasserstands auf der Binnenseite des Sperrwerks hängt von drei Faktoren ab:

- i) dem zur Verfügung stehenden Stauraum hinter dem Sperrwerk,
- ii) dem Zufluss von Wasser aus dem Einzugsgebiet und über die Schöpfwerke sowie
- iii) der Dauer der Sperrung.

Der Stauraum hinter dem Sperrwerk (Abschnitt 4.2.1) ist eine weitgehend fixierte Größe. Er ist bestimmt durch die Topographie des Gewässers, die Höhe und die Größe der Deichvorländer sowie den Schließwasserstand der Sperrwerke. Die einzige Variable dabei ist der Schließwasserstand, der in der jeweiligen Schließordnung des Sperrwerks festgelegt ist. Der Zufluss aus dem Einzugsgebiet ist vorgegeben durch den Binnenabfluss aus dem Einzugsgebiet des Oberlaufes und den Zufluss aus dem Einzugsgebiet des Unterlaufes, der über die Schöpfwerke eingetragen wird. Die Dauer der Sperrung hängt vom Verlauf des Sturmflutwasserstands ab, wobei insbesondere den Tiefpunkten der Ganglinie (die  $T_{nw}$ ) eine entscheidende Bedeutung zukommt.

### 4.3.1 Beschreibung und Auswahl der Lastfälle

In der derzeitigen Praxis werden im Rahmen der Ausweisung der Überschwemmungsgebiete Annahmen bezüglich der Größe des Zuflusses und der Dauer der Sperrung getroffen. Die Größe des Zuflusses aus dem Einzugsgebiet des Oberlaufes wird durch ein statistisches Hochwasserereignis vorgegeben, z.B. ein Ereignis mit einem Wiederkehrintervall von fünf Jahren ( $HQ_5$ ) (BUE 2015). Für die Größe des Zuflusses über die Schöpfwerke werden zumeist pauschale Annahmen getroffen, da aufgrund mangelnder Daten in der Regel keine genaueren Auswertungen über Betriebszeiten oder Fördermengen bei variierendem Außenwasserstand vorliegen. Bei der Festlegung der Dauer der Sperrung wird von einer Kettentide in der Elbe ausgegangen, die mehrere hohe Tnw und Thw in Folge umfasst, wodurch keine oder nur eine eingeschränkte Entwässerung stattfinden kann (Golder Associates 2011; BWS GmbH 2015). Im weiteren Verlauf werden zwei Lastfälle näher untersucht, die angelehnt sind an die in der Praxis verwendeten.

#### 4.3.1.1 Lastfall A

Lastfall A setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- i) Binnenzufluss: Scheitelwert eines  $HQ_5$ , Verlauf der Ganglinie entsprechend eines real aufgetretenen charakteristischen Ereignisses, ungünstige zeitliche Überlagerung mit der Sperrung, d.h. die maximale Fülle, die während der Sperrdauer auftreten kann, entwässert während der Sperrung.
- ii) Schöpfwerkszufluss: 60% der nominellen Förderleistung während der gesamten Dauer der Sperrung.
- iii) Sperrdauer: Schließung bei Schließwasserstand laut Betriebsordnung des Sperrwerks, keine Entwässerungsmöglichkeit über zwei Thw und ein Tnw, Beginn der Entwässerung im Ebbast nach dem zweiten Thw.

Die Annahmen zur Definition des ausgewählten Lastfalls A sind in Abbildung 69 verdeutlicht. Hier sind die Verläufe der Ganglinien des Außen- und Binnenwasserstandes sowie des Binnenabflusses und des Schöpfwerkszuflusses dargestellt.

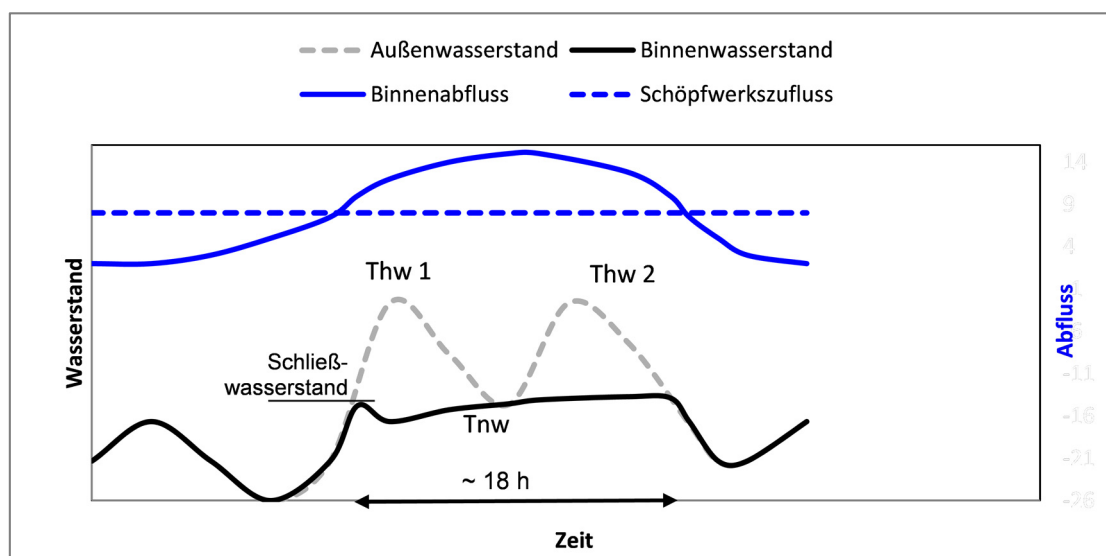


Abbildung 69: Ganglinien Lastfall A, schematische Darstellung

Die Sperrung beginnt im Flutast des ersten Thw der Kettentide mit der Schließung des Sperrwerks. Der Wasserstand, bei dem die Schließung erfolgt, ist in der jeweiligen Betriebsordnung des Sperrwerks festgelegt (Abschnitt 4.1.1). Unmittelbar nach Beginn der Sperrung fällt der Binnenwasserstand leicht ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Flutstrom im Unterlauf des Nebenflusses ein Wasserspiegelgefälle in Richtung stromauf besteht. Durch die Sperrung erhält die Strömung keinen weiteren Impuls aus dem Flutstrom der Elbe. In der Folge kommt es binnenseitig zu einer Beruhigung der Strömung und einem Ausspiegeln des Wasservolumens. Aufgrund des zuvor vorhandenen Wasserspiegelgefälles in Richtung Oberstrom, liegt der ausgespiegelte Wasserstand (Ruhewasserstand) unterhalb des Schließwasserstandes.

Der Binnenabfluss sowie der Schöpfwerkszufluss sorgen für einen Anstieg des Wasserspiegels, wobei die Anstiegsrate vom zufließenden Wasservolumen und dem vorhandenen Stauraum abhängt. Nach dem ersten Thw fällt der Außenwasserstand ab und nähert sich dem Niveau des Binnenwasserstandes. Nach etwa neun Stunden tritt das erste Tnw der Kettentide ein. Da die Annahme besagt, dass keine Entwässerung stattfindet, muss die Höhe des Tnw mindestens das Niveau des Binnenwasserstandes erreichen. Anschließend bleibt das Sperrwerk noch über das zweite Thw der Kettentide geschlossen, bis schließlich im Verlauf des zweiten Ebbastes der Kettentide eine Entwässerung erfolgen kann. Für den beschriebenen Verlauf ergibt sich eine Gesamtdauer der Sperrung von etwa 18 h.

#### 4.3.1.2 Lastfall B

Lastfall B setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- i) Binnenzufluss: Scheitelwert eines  $HQ_5$ , Verlauf der Ganglinie entsprechend eines real aufgetretenen charakteristischen Ereignisses, ungünstige zeitliche Überlagerung mit der Sperrung, d.h. die maximale Fülle, die während der Sperrdauer auftreten kann, entwässert während der Sperrung.
- ii) Schöpfwerkszufluss: 60% der nominellen Förderleistung während der gesamten Dauer der Sperrung.
- iii) Sperrdauer: Schließung bei Schließwasserstand laut Betriebsordnung des Sperrwerks, keine Entwässerungsmöglichkeit über drei Thw und zwei Tnw, Beginn der Entwässerung im Ebbast nach dem dritten Thw.

Die Annahmen zur Definition des ausgewählten Lastfalls B sind in Abbildung 70 verdeutlicht. Hier sind die Verläufe der Ganglinien des Außen- und Binnenwasserstandes sowie des Binnenabflusses und des Schöpfwerkszuflusses dargestellt.

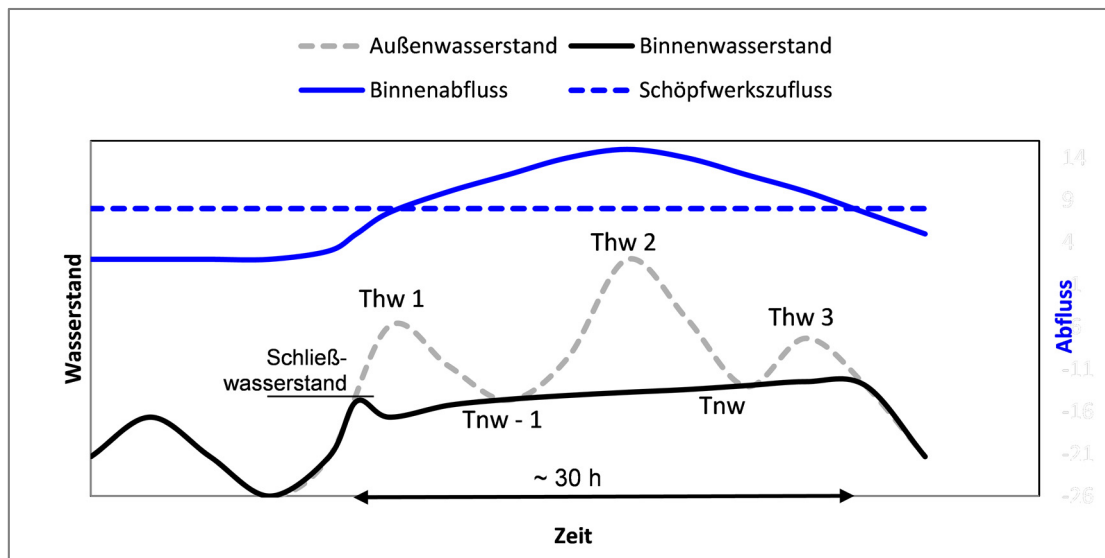


Abbildung 70: Ganglinien Lastfall B, schematische Darstellung

Die Sperrung beginnt im Flutast des ersten Thw der Kettentide mit der Schließung des Sperrwerks. Der Wasserstand, bei dem die Schließung erfolgt, ist in der jeweiligen Betriebsordnung des Sperrwerks festgelegt (Abschnitt 4.1.1). Unmittelbar nach Beginn der Sperrung fällt der Binnenwasserstand leicht ab (siehe Lastfall A). Der Binnenabfluss sowie der Schöpfwerkszufluss sorgen für einen Anstieg des Wasserspiegels, wobei die Anstiegsrate vom zufließenden Wasservolumen und dem vorhandenen Stauraum abhängt. Nach dem ersten Thw der Kettentide fällt der Außenwasserstand ab und nähert sich dem Niveau des Binnenwasserstandes. Nach etwa neun Stunden tritt das erste Tnw der Kettentide (Tnw-1) ein. Da die Annahme besagt, dass keine Entwässerung stattfindet, muss die Höhe des Tnw-1 mindestens das Niveau des Binnenwasserstandes erreichen. Auch das zweite Tnw der Kettentide (Tnw), das nach etwa 21,5 h eintritt, muss mindestens das Niveau des Binnenwasserstandes nach 21,5 h erreichen. Anschließend bleibt das Sperrwerk noch über ein drittes Thw geschlossen, bis schließlich eine Entwässerung während des dritten Ebbastes der Kettentide erfolgen kann. Für den beschriebenen Verlauf ergibt sich eine Gesamtdauer der Sperrung von etwa 30 h.

#### 4.3.1.3 Wasserstände

Die Höhen, die das Tnw (Lastfall A) bzw. die beiden Tnw (Lastfall B) mindestens erreichen müssen damit keine Öffnung des Sperrwerks möglich ist, sind zunächst noch unbekannt. Diese können entweder mit Hilfe des hydrodynamisch-numerischen Modells ermittelt oder vereinfacht auf der Grundlage der W-V-Beziehung (Abschnitt 4.2.1) abgeschätzt werden. In Abbildung 71 sind die mit Hilfe der hydrodynamisch-numerischen Modelle simulierten Wasserstandsganglinien an den Binnenpegeln der Mündungsschöpfwerke dargestellt. Außerdem sind an den Wasserstandsganglinien die Zeitpunkte gekennzeichnet, zu denen die beiden Tnw erwartet werden (Tnw-1 nach 9,0 Stunden, Tnw nach 21,5 Stunden). Aus den zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Wasserständen ergeben sich die Mindesthöhen der beiden Tnw im Verlauf des Außenwasserstandes. Die bei den Berechnungen angesetzten Randbedingungen sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Die Sperrwerke werden im Modell gemäß der aktuell gültigen Betriebsordnungen gesteuert. Das Krückau-Sperrwerk schließt bei 2,2 m ü. NHN. Das Äußere Este-Sperrwerk schließt bei 2,6 m ü. NHN. Zu diesem Zeitpunkt ist das Innere Este-Sperrwerk bereits geschlossen. Gemäß

Schließordnung wird das Innere Este-Sperrwerk bei sehr schweren Sturmfluten in Verbindung mit hohem Oberwasserzufluss bereits beim Tnw vor Einsetzen der Sturmflut geschlossen (Fröhle und Nehlsen 2013). Der entstandene Stauraum reicht aus, um den Binnenabfluss für etwa 14 h aufzunehmen. Erst dann öffnet das Innere Este-Sperrwerk, wodurch nun auch der Binnenwasserstand am Äußeren Este-Sperrwerk ansteigt. Zuvor stagniert dieser bei 2,6 m ü. NHN, da keine Schöpfwerke in den Bereich der Este zwischen den Sperrwerken entwässern. Das Fehlen des typischen Absperrunks in der Ganglinie des Wasserstands auf der Binnenseite des Äußeren Este-Sperrwerks ist ebenfalls darauf zurückzuführen, dass das Innere Este-Sperrwerk bereits vorher geschlossen wurde. Aufgrund der kurzen Distanz zwischen den Sperrwerken strömt nach der Schließung des Inneren Este-Sperrwerks nur noch vergleichsweise wenig Wasser in die Este. Damit ist auch die Strömungsgeschwindigkeit zu gering, um beim Schließen des Äußeren Este-Sperrwerks einen merkbaren Sunk hervorzurufen.

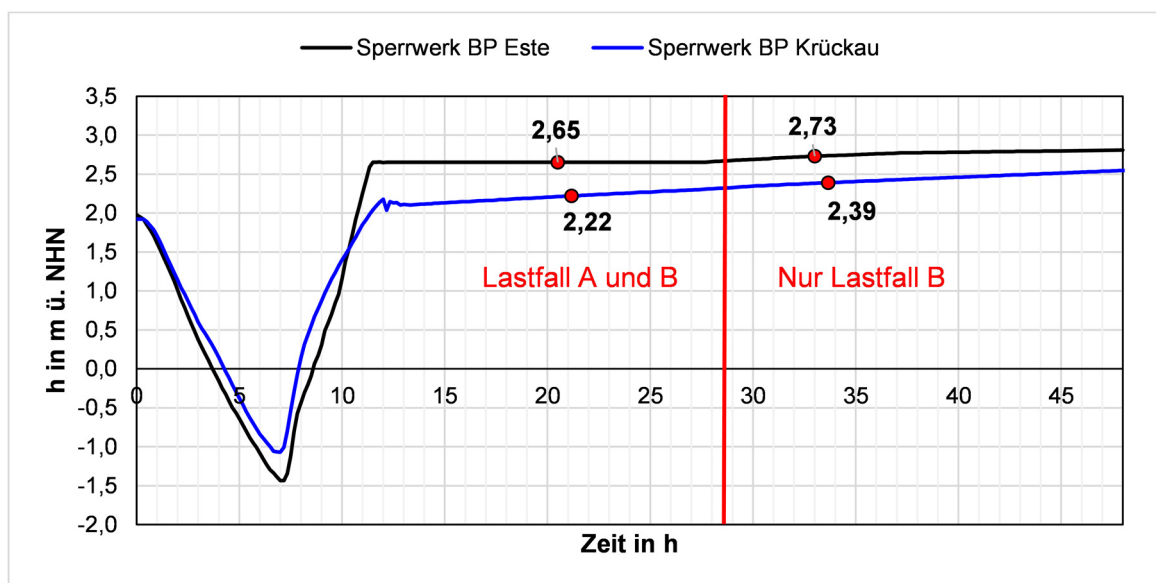


Abbildung 71: Simulierte Wasserstandsganglinien an den Binnenpegeln der Sperrwerke während des ausgewählten Lastfalls (HQ<sub>5</sub> plus 60% Schöpfwerksleistung bei zwei gesperrten Tnw in Folge)

Tabelle 15: Randbedingungen bei der Simulation des Binnenwasserstands während der ausgewählten Lastfälle

	Este	Krückau
Scheitelabfluss Hochwasserereignis (HQ <sub>5</sub> )	$Q = A_{E, Emmen} / A_{E, Bux} * HQ_{5, Emmen}$ $= 1,64 * 9,98 = 16,37 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = HQ_{5, A23} + HQ_{5, Offenau}$ $= 12,92 + 3,2 = 16,12 \text{ m}^3/\text{s}$
Fülle der Ganglinie	HQ vom 18./19.07. 2002	HQ vom 28./29.10.1998
Zufluss über die Schöpfwerke (60% der nominellen Gesamtleistung)	8,0 m <sup>3</sup> /s	12,1 m <sup>3</sup> /s

### 4.3.2 Auswertung der Datengrundlage

Die Ermittlung des Wiederkehrintervalls der ausgewählten Lastfälle erfordert eine kombinierte Betrachtung der Einzelkomponenten (Binnenabfluss, Tnw-Kette). Im Folgenden werden die zur Verfügung stehenden Daten analysiert und statistisch ausgewertet.

An den Nebenflüssen stehen Abflusszeitreihen an Pegeln im oberen Einzugsgebiet zur Verfügung, die bereits in Abschnitt 4.2.2.1 analysiert und statistisch ausgewertet wurden. Im Bereich der Mündungen stehen Wasserstandszeitreihen von Elbe-Pegeln zur Verfügung. Wie in Abschnitt 3.3.1.3 gezeigt wurde, weisen diese signifikante Trends auf, die vor allem auf Änderungen zwischen dem Jahr der Inbetriebnahme (1960er Jahre) und dem Beginn der 1980er Jahre zurückzuführen sind. Die Tnw, die an dieser Stelle von Interesse sind, sind mit den stärksten Trends behaftet.

Eine Kürzung der Zeitreihen durch Weglassen der Daten vor den 1980er Jahren würde dazu führen, dass die Stichproben, die in die spätere extremwertstatistische Auswertung einfließen, nur einen geringen Umfang hätten. Dieser wäre vermutlich zu gering, um eine gute Anpassung einer Verteilungsfunktion zu erzielen und damit zuverlässige Aussagen zu hohen Wiederkehrintervallen zu treffen. Dementsprechend sind zunächst geeignete Wasserstandszeitreihen zu ermitteln. Ferner ist zu prüfen, ob die einzelnen Komponenten (Binnenabfluss und Tnw-Kette) in irgendeiner Form voneinander abhängig sind oder ob deren Zusammentreffen als rein zufällig betrachtet werden kann. Im Anschluss werden die Stichproben einer univariaten bzw. bivariaten Analyse unterzogen, die die Grundlage für die statistische Einordnung der ausgewählten Lastfälle bildet. Die gesamte Methodik wird am Beispiel der Fokusgewässer Este und Krückau umgesetzt.

#### 4.3.2.1 Abflüsse und Wasserstände

Nahe den Mündungen der beiden Fokusgewässer befinden sich Pegel in der Elbe, die den Wasserstand aufzeichnen (Pegel Cranz nahe der Estemündung, Pegel Kollmar nahe der Krückaumündung). Für beide Pegel liegen Tnw-Zeitreihen (Aufzeichnungsbeginn: Cranz 01.11.1959, Kollmar 01.11.1964) vor. Beide weisen signifikante Veränderungen zwischen Aufzeichnungsbeginn 1959 bzw. 1964 und Anfang der 1980er Jahre auf.

Grundsätzlich erscheinen zwei Ansätze sinnvoll, um möglichst lange Zeitreihen für die nachfolgenden Untersuchungen zur Verfügung zu stellen. Der erste Ansatz sieht die Bereinigung der vorliegenden Tnw-Zeitreihen an den beiden Pegeln vor. Dazu sind zunächst die Knickpunkte des Trends in den Zeitreihen zu identifizieren. Anschließend wird die Zeitreihe am Knickpunkt zerteilt, beide Teile werden bereinigt und anschließend wieder zusammengefügt. Abschließend wird die zusammengefügte Zeitreihe auf das heutige Niveau verschoben. Der zweite Ansatz sieht die Simulation von Tnw-Zeitreihen mit einem Modell vor. Der Einsatz eines aufwändigen Modells, z.B. eines hydrodynamisch-numerischen Modells, erscheint an dieser Stelle nicht gerechtfertigt. Ein einfaches Modell, z.B. ein Regressionsmodell, mit dem die gemessenen Daten eines anderen Pegels (z.B. Cuxhaven) transferiert werden, erscheint praktikabel. Dabei ist eine ausreichende Genauigkeit sicherzustellen. In diesem Fall hätte der zweite Ansatz gegenüber dem ersten den Vorteil, dass eine sehr lange Zeitreihe erzeugt werden könnte. Für den Pegel Cuxhaven, der für das Vorhaben geeignete Werte liefert, steht eine Tnw-Zeitreihe seit 1900 zur Verfügung, die auf andere Standorte übertragen werden könnte.

Dementsprechend wird im Rahmen dieser Arbeit der zweite Ansatz weiter verfolgt. In Abbildung 72 sind die Tnw-Wasserstände am Pegel Kollmar über die Tnw-Wasserstände am Pegel Cuxhaven aufgetragen. Da bekannt ist, dass es vor 1980 deutliche Änderungen gab, werden nur die Werte im Zeitraum 01.11.1980 – 31.10.2011 betrachtet. Im Streudiagramm zeigt sich ein abschnittsweise linearer Zusammenhang. Die Koeffizienten der Transferfunktionen sind in Tabelle 16 dargestellt.

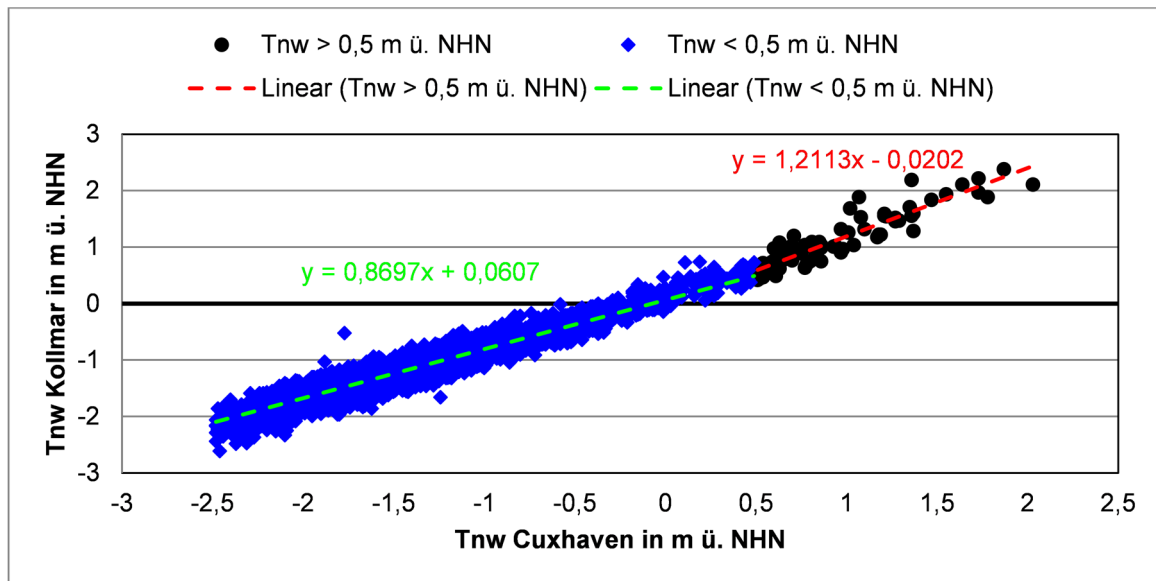


Abbildung 72: Streudiagramm der Tnw an den Pegeln Cuxhaven und Kollmar sowie Transferfunktionen zur Übertragung, Zeitraum 01.11.1980 – 31.10.2011, (Daten: WSV)

Tabelle 16: Transferfunktionen zur Übertragung des Tnw am Pegel Cuxhaven auf die Pegel Kollmar und Cranz, Zeitraum 01.11.1980 – 31.10.2011

	Kollmar	Cranz
> 0,5 m ü- NHN	$1,2113x - 0,0202$	$1,2703x - 0,2293$
-2,5 m ü. NHN – 0,5 m ü. NHN	$0,8697x + 0,0607$	$0,9241x - 0,0418$

In Abbildung 73 sind die gemessenen über die simulierten Werte für den Pegel Kollmar aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Werte nur sehr geringfügig um die Winkelhalbierende streuen und das Modell somit geeignet ist. Die gleiche Art der Gegenüberstellung für die Daten vom Pegel Cranz zeigt ein ähnliches Ergebnis. Durch die Anwendung des Verfahrens stehen nun für die weiteren Untersuchungen für die Pegel Cranz und Kollmar zwei simulierte Tnw-Zeitreihen über 115 Jahre (1900 – 2015) zur Verfügung.

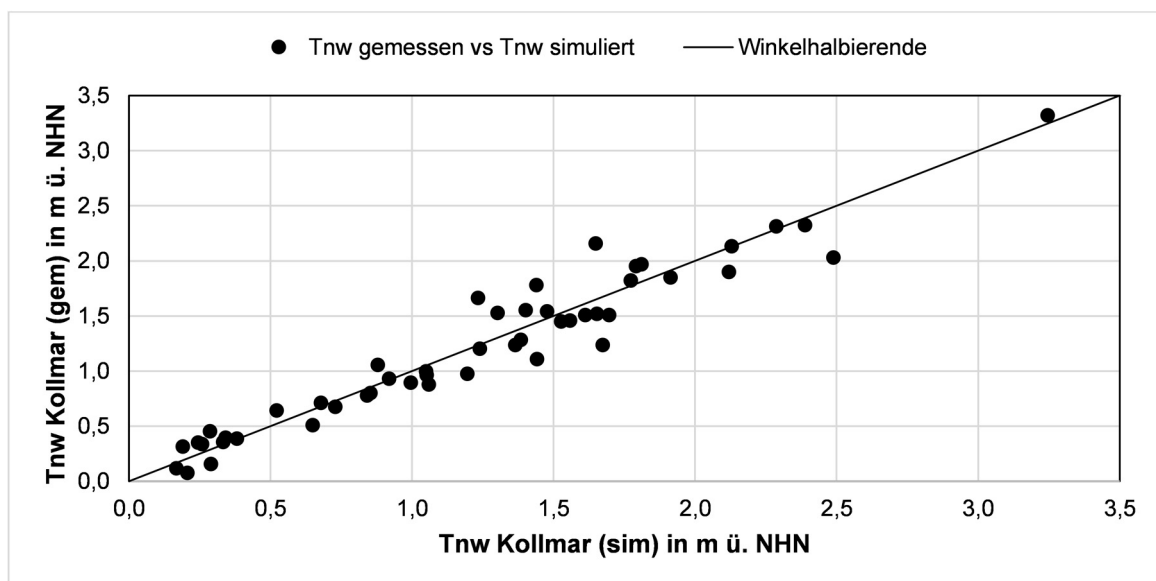


Abbildung 73: Streudiagramm des simulierten und der gemessenen Werte am Pegel Kollmar, Zeitraum 01.11.1964 – 31.10.2011, (Daten: WSV)

### 4.3.2.2 Abhängigkeit zwischen Wasserstand und Abfluss

Weiterhin ist festzustellen, ob das Zusammentreffen des Binnenabflussereignisses mit der Tnw-Kette als rein zufällig betrachtet werden kann oder nicht. Von dem Ergebnis hängt das weitere Vorgehen ab. Ist das Zusammentreffen der Komponenten rein zufällig, dann können die Wiederkehrintervalle der Einzelkomponenten univariat bestimmt und miteinander multipliziert werden. Ist das Zusammentreffen nicht rein zufällig, wird eine multivariate Betrachtung erforderlich.

Die Beurteilung erfolgt zum einen auf der Grundlage der Statistik (Korrelationskoeffizient) und zum anderen auf der Grundlage einer phänomenologischen Betrachtung. Die Kombination aus statistischer und phänomenologischer Betrachtung ist erforderlich, da eine rein mathematische Analyse nur auf den zugrunde gelegten Stichproben basiert, während die Kausalität der Ereignisse nicht betrachtet wird. Das kann dazu führen, dass eine Korrelation ermittelt wird, die von der Kausalität her nicht gegeben ist (Scheinkorrelation). Andersherum ist es auch möglich, dass keine Korrelation ermittelt wird, obwohl ein kausaler Zusammenhang gegeben ist. Aus diesem Grund ist die Korrelationsanalyse immer durch eine phänomenologische Betrachtung zu ergänzen.

Abbildung 74 zeigt das Streudiagramm der mittleren Tagesabflüsse am Pegel A23 und des Wasserstandes des höheren der beiden am jeweiligen Tag eingetretenen Tnw am Elbe-Pegel Kollmar nahe der Krückaumündung.

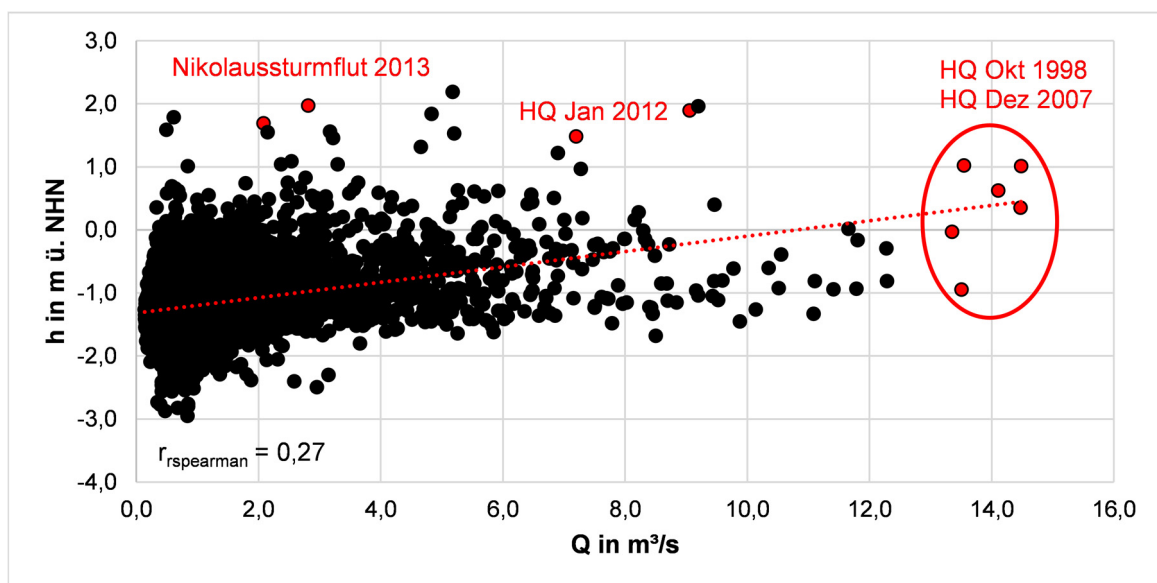


Abbildung 74: Streudiagramm der Tagesmittelwerte des Abflusses am Pegel A23 (Krückau) und dem höchsten Tages-Tideniedrigwasser am Pegel Kollmar (Elbe), Zeitraum 01.11.1995- 31.10.2014, (Daten: WSV)

Eine Trendanalyse ergab für beide Datensätze keinen signifikanten Trend. Die grafische Analyse der Stichproben auf eine normalverteilte Grundgesamtheit (Quantil-Quantil-Plots) zeigt, dass beide Stichproben nicht normalverteilt sind. Dementsprechend wird eine Korrelationsanalyse nach *Spearman* durchgeführt, die einen Korrelationskoeffizienten von 0,27 ergibt. Bei einem Korrelationskoeffizienten zwischen 0,3 und 0,5 wird im Allgemeinen von einer schwachen Korrelation ausgegangen. Der ermittelte Wert liegt nahe an der unteren Grenze. Möglicherweise führt eine geringfügige Änderung der Länge der Zeitreihen dazu, dass die Grenze erreicht wird.

Dementsprechend erfolgt noch eine Überprüfung anhand der phänomenologischen Betrachtung. Aus meteorologischer Sicht ist es zumindest denkbar, dass ein Tiefdruckgebiet die Nordsee aus westlichen Richtungen kommend überquert und neben starkem Wind aus westlicher Richtung auch hohe Niederschläge in den Einzugsgebieten der Nebenflüsse verursacht. Der starke Wind sorgt dann für erhöhte Wasserstände in der Elbe und der hohe Niederschlag für Hochwasserabflüsse. Dagegen spricht, dass die Reaktionszeit des Abflusses in den Nebenflüssen auf den Niederschlag mehrere Stunden ( $> 5$  h) beträgt und damit etwas länger als die Laufzeit der Tidewelle in der Elbe ( $\sim 3$  h) ist.

Das Beispiel der Nikolaussturmflut 2013 zeigt, dass sich Sturmfluten und Hochwasserabflüsse nicht zwangsläufig überlagern (Abbildung 75). Das Tief, das die Sturmflut mit zwei sehr hohen Tnw in Folge verursachte, brachte also keine nennenswerten Niederschläge im Einzugsgebiet der Krückau. Während des Hochwasserereignisses im Oktober 1998 traten hingegen mehrere hohe Tnw auf (Abbildung 76). Für die Bewertung des Streudiagramms (Abbildung 74) bedeutet dies, dass eine mögliche Korrelation von sehr wenigen Ereignissen stark beeinflusst wird. Die sechs Punkte ganz rechts (hohe Abflüsse) sind auf lediglich zwei Hochwasserereignisse zurückzuführen. Die Nikolaussturmflut 2013 und das Hochwasser im Januar 2012 sind mit zwei Punkten in der Darstellung vertreten.

Bei den Stichproben in Abbildung 74 handelt es sich also keineswegs um unabhängige Werte. Vielmehr beeinflussen sehr wenige Ereignisse die Korrelation sehr stark, so dass der Korrelationskoeffizient keine Aussage hat.

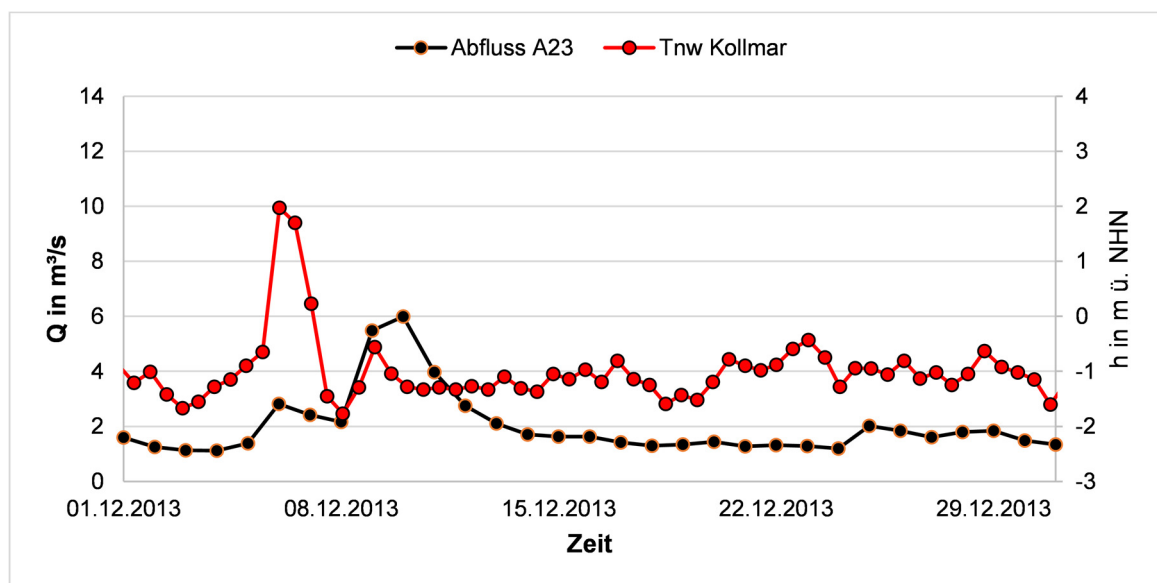


Abbildung 75: Tagesmittelabfluss am Pegel A23 und Tnw-Höhen am Pegel Kollmar im Dezember 2013, (Daten: LKN-SH, WSV)

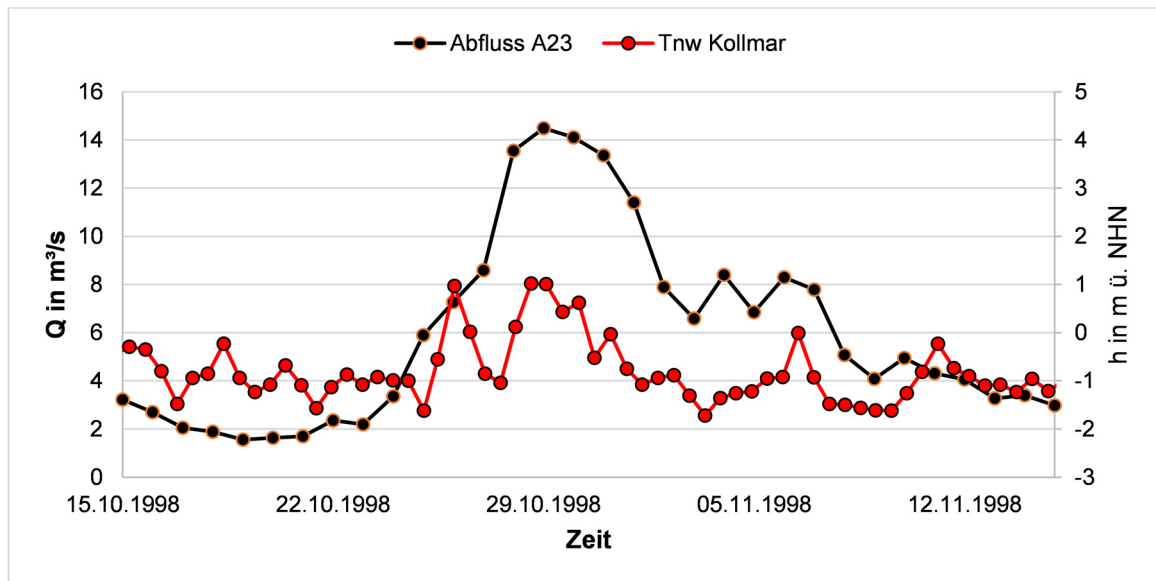


Abbildung 76: Tagesmittelabfluss am Pegel A23 und Tnw-Höhen am Pegel Kollmar im Oktober/November 1998, (Daten: LKN-SH, WSV)

Würde die geschilderte Wetterlage häufig für hohe Abflüsse und hohe Wasserstände sorgen, dann wäre im Streudiagramm (Abbildung 74) eine Anhäufung der Punkte oben rechts (hoher Abfluss und hohes Tnw) zu erkennen. Da dies nicht der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass kein Zusammenhang zwischen erhöhten Binnenabflüssen und erhöhten Tnw-Ereignissen besteht.

Im nächsten Schritt ist festzustellen, ob zwischen den beiden erhöhten Tnw innerhalb der Tidekette ein Zusammenhang besteht. In Abbildung 77 ist das Tnw am Elbe-Pegel Kollmar nahe der Krückaumündung über dem jeweiligen vorausgegangenen Tnw aufgetragen. Die Korrelationsanalyse nach *Spearman* ergibt einen Korrelationskoeffizienten von 0,7. In diesem Bereich wird im Allgemeinen von einer starken Korrelation ausgegangen. Allerdings ist erkennbar, dass die Korrelation vor allem durch die vielen niedrigen Tnw beeinflusst wird. Diese haben jedoch keine Relevanz für die Betrachtung von langen Sperrzeiten von Sperrwerken.

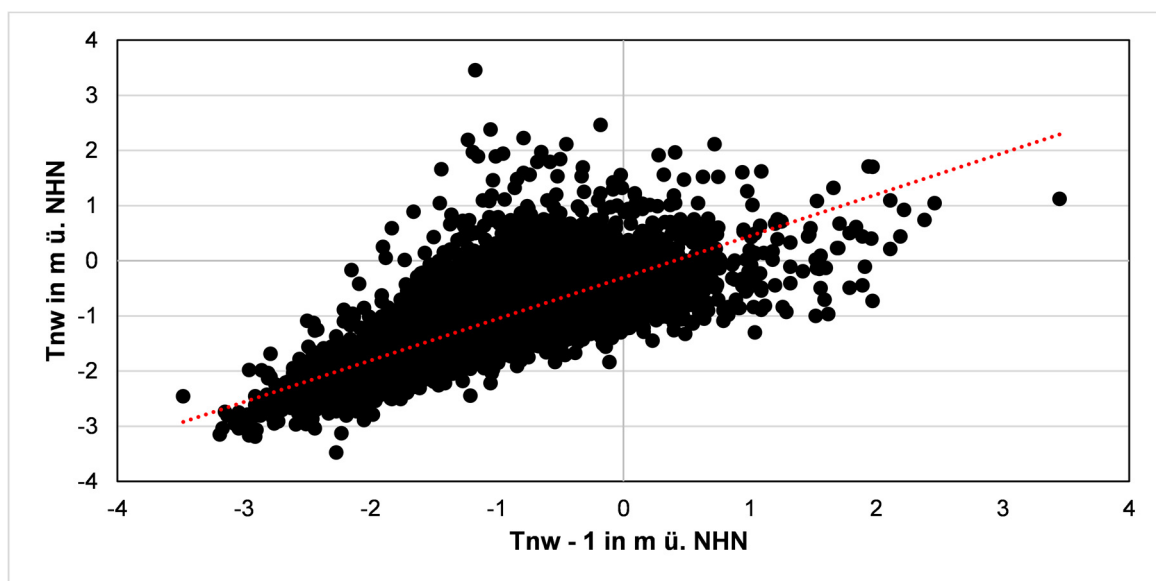
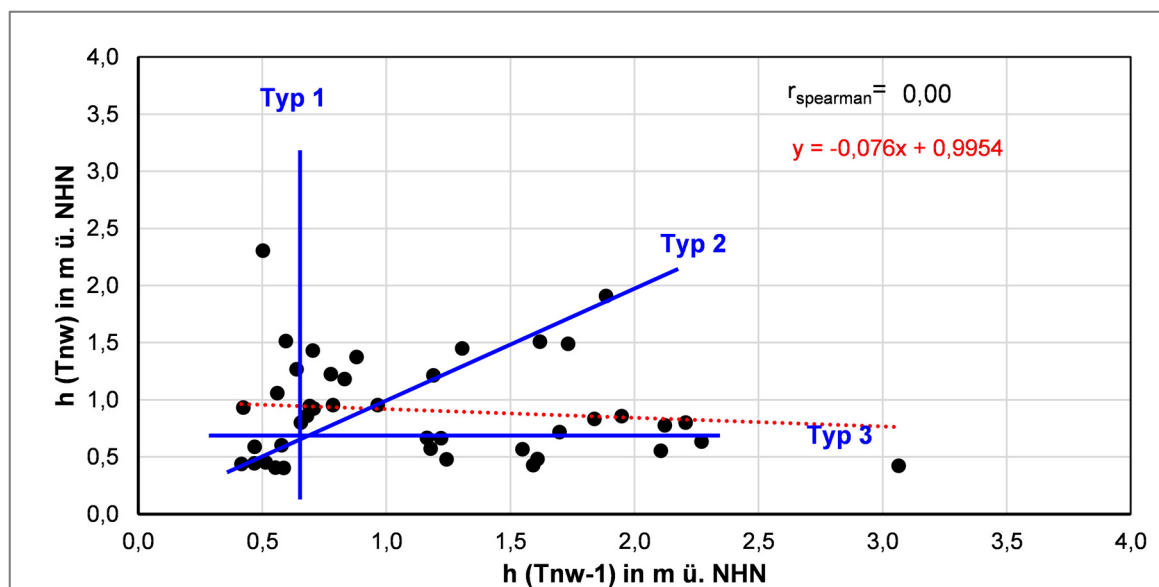


Abbildung 77: Streudiagramm des Tnw (Tnw) und des vorangegangenen Tnw (Tnw-1) am Pegel Kollmar (Elbe), Zeitraum 01.11.1995- 31.10.2014, (Daten: WSV)

Sinnvollerweise sind also nur deutlich erhöhte Tnw in die Betrachtung einzubeziehen. Als Kriterium, ab dem zwei aufeinander folgende Tnw als erhöht eingestuft und somit in die Stichprobe aufgenommen werden, wird die Definition nach (Siefert 1985) und (Gönnert und Siefert 1998) verwendet. Beide definieren eine Sturmflut in der Elbe als Windstau von mindestens zwei Metern über der mittleren Tidekurve (ebd.). Dieser kann zu irgendeiner Tidephase auftreten, d.h. auch zu Tnw. Maßgebend für die Aufnahme eines Ereignisses in die Stichprobe ist der Windstau am Pegel Cuxhaven. Unter Anwendung der Transferfunktionen (Abschnitt 4.3.2.1) werden aus der Stichprobe Cuxhaven die beiden Stichproben für Cranz und Kollmar berechnet.

In Abbildung 78 sind die Wertepaare der Stichprobe Kollmar gegeneinander aufgetragen. Entsprechend der zeitlichen Reihenfolge des Auftretens ist das vorangehende Ereignis (Stichprobenbezeichnung: Tnw-1) auf der Abszisse und das folgende Ereignis (Stichprobenbezeichnung: Tnw) auf der Ordinate aufgetragen. Die Korrelationsanalyse nach *Spearman* ergibt einen Korrelationskoeffizienten von null, d.h. keine Korrelation.



**Abbildung 78: Streudiagramm des erhöhten Tnw (Tnw) und des vorangegangenen erhöhten Tnw (Tnw-1) am Pegel Kollmar (Elbe), alle Tnw > 2 m Windstau, Zeitraum 01.11.1995- 31.10.2014, (Daten: WSV)**

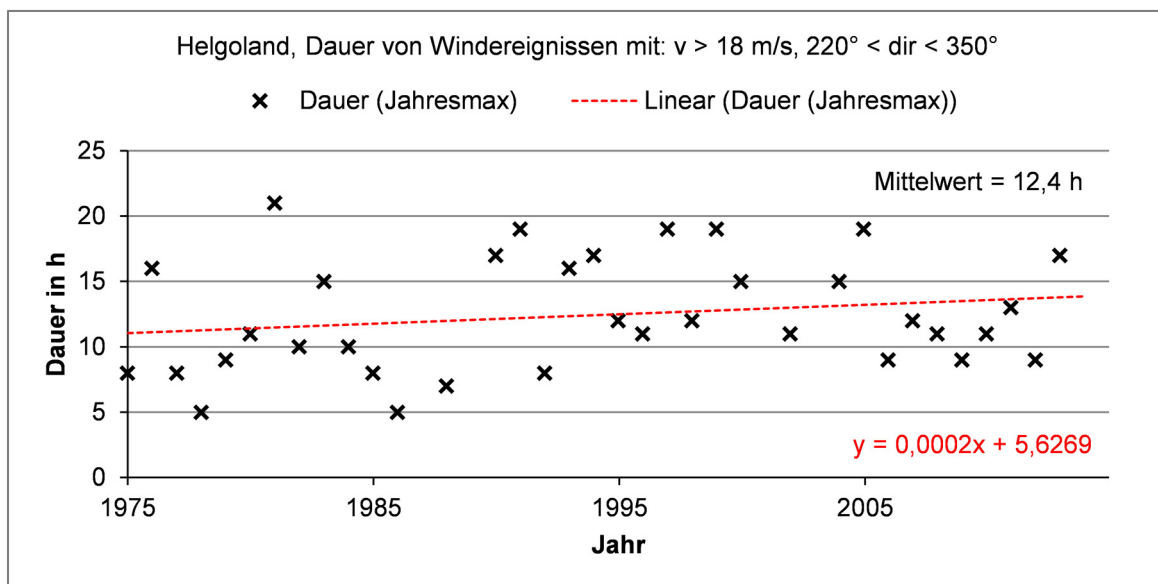
Die fehlende Korrelation besagt jedoch noch nicht, dass auch kein kausaler Zusammenhang existiert. Vielmehr zeigt die nachfolgende phänomenologische Betrachtung, dass ein kausaler Zusammenhang besteht.

Die meteorologische Ursache für eine Sturmflut in der Elbe ist ein Tiefdruckgebiet, das hohe Windgeschwindigkeiten hervorruft und die Nordsee aus westlichen Richtungen kommend überquert. Nach (Proetel 1921) beträgt im nördlichen Teil Europas (und somit auch über der Nordsee) der mittlere Durchmesser eines Tiefdruckgebietes 1600 – 3000 km, wobei der innerste Teil, der die höchsten Windgeschwindigkeiten aufweist, eine Ausdehnung von 300 – 400 km hat. Die mittlere Fortschrittsgeschwindigkeit des Tiefdruckgebietes relativ zur Erde beträgt nach (Proetel 1921) 6 – 8 m/s. Demzufolge dauert es 10,4 – 18,5 h, bis der innerste Teil eines Tiefdruckgebietes einen fixen Punkt auf der Erde überquert hat. Der Mittelwert der Zeitspanne beträgt 14,4 h und übertrifft damit die Tidedauer von 12,42 h. Die abgeschätzte Zeitspanne wird durch die nachfolgende Auswertung von Messdaten der Station Helgoland bestätigt. In die Auswertung werden Windereignisse einbezogen, die

eine Windgeschwindigkeit (Stundenmittel) von mehr als 18 m/s (Windstärke 8 und größer) haben und zudem eine westliche Richtung ( $220^\circ - 350^\circ$ ) aufweisen.

Die Grenze der Windgeschwindigkeit ergibt sich aus einem Vergleich der Windgeschwindigkeit an der Station Cuxhaven mit dem Windstau bei Tnw am Pegel Cuxhaven. Dieser Vergleich zeigt, dass bei einer Windgeschwindigkeit von 18 m/s der mittlere Windstau bei Tnw am Pegel Cuxhaven in etwa zwei Meter beträgt. Die Eingrenzung der Richtung auf  $220^\circ - 350^\circ$  erfolgt in Anlehnung an (Gönnert et al. 2010).

Die Auswertung der Jahresmaxima (1975 - 2014) ergibt eine mittlere Dauer der definierten Ereignisse von 12,4 h (Abbildung 79). Dieser Wert entspricht der mittleren Tidedauer von 12,4 h, was etwas kürzer ist als der überschläglich berechnete Wert von 14,4 h.



**Abbildung 79: Dauer von starken Windereignissen aus westlichen Richtungen, Station Helgoland (Daten: DWD)**

Geht man von einer mittleren Dauer des Windereignisses von 12,4 h aus und überlagert dieses Ereignis mit der Tidekurve, dann ergeben sich prinzipiell drei unterschiedliche Varianten. Entweder trifft das Windfenster nur das zweite Tnw (Typ 1), beide Tnw (Typ 2) oder nur das erste Tnw (Typ 3) (Abbildung 80).

Wirft man einen Blick zurück auf Abbildung 78, dann erkennt man hierin ebenfalls die drei Typen. Diese sind durch die blauen Linien gekennzeichnet. Im betrachteten Zeitraum treten die Ereignisse vom Typ 1 und Typ 3 etwa gleich häufig auf. Das Ereignis vom Typ 2 tritt etwas seltener auf. Da sich die Aussagen der drei Typen grundsätzlich unterscheiden, ist die Korrelation der gesamten Stichprobe gleich null. Die unterschiedlichen Häufigkeiten ergeben sich aus der Dauer des Windfensters. Da die Länge in etwa der Tidedauer entspricht ist es wahrscheinlicher, dass eine Überschneidung mit nur einem Tnw stattfindet.

Die phänomenologische Betrachtung ergibt also einen Zusammenhang zwischen den beiden Tnw der Tidekette und liefert zugleich eine Erklärung für die fehlende Korrelation. Ein statistischer Zusammenhang besteht über die Stichprobendefinition (Windstau größer als zwei Meter), woraus sich eine Aussage über die Häufigkeiten und die Wahrscheinlichkeiten ergibt.

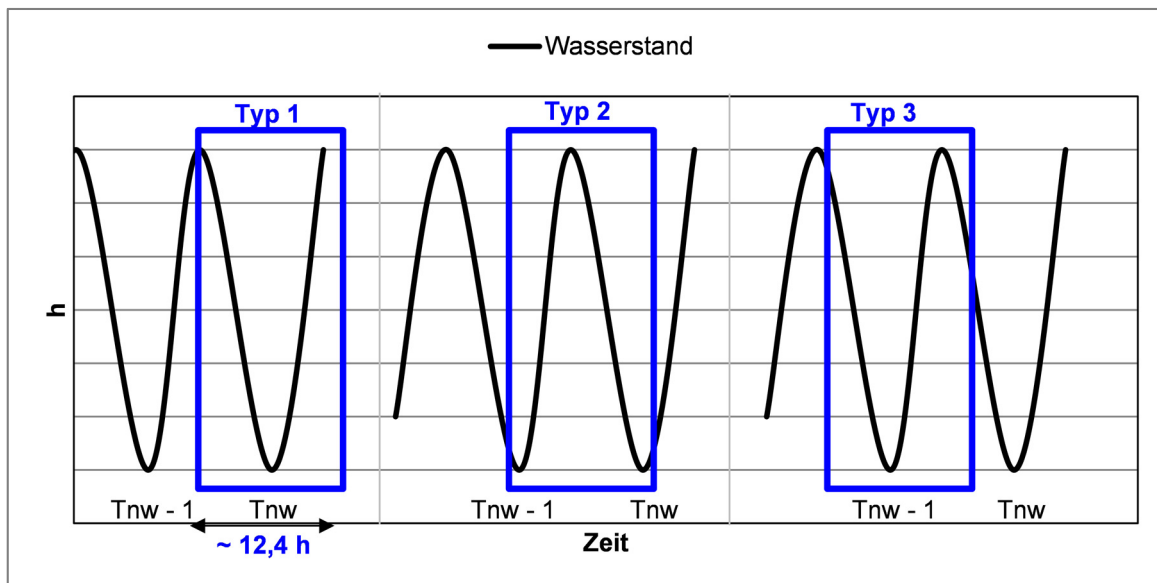


Abbildung 80: Varianten der Überlagerung eines Windfensters von 12,4 h mit der Tide

#### 4.3.2.3 Univariate Untersuchungen (Lastfall A)

Um Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeit eines hohen  $T_{nw}$  zu treffen, werden die jährlichen Maxima der  $T_{nw}$  ausgewertet. Zuvor werden die Jahresmaxima entfernt, die nicht mindestens einen Windstau von zwei Metern aufweisen. Insgesamt ergeben sich somit aus den 115 Jahre umfassenden Zeitreihen für die Pegel Cranz und Kollmar Stichproben mit jeweils 98 Werten. In Abbildung 81 und Abbildung 82 sind die Anpassungen ausgewählter Extremwertverteilungen dargestellt. Die Anpassung erfolgte mit Hilfe der Methode der L-Momente. Zur Beurteilung der Güte der Anpassung sind die Stichproben dargestellt. Dafür wurde die plotting position (PLP) nach Weibull verwendet. In beiden Fällen wurde die GEV als beste Anpassung ausgewählt. In den beiden Abbildungen ist die jeweilige Mindesthöhe gekennzeichnet, die das  $T_{nw}$  im Lastfall A ( $HQ_5$ , 60% Schöpfwerkszufluss, ein gesperrtes  $T_{nw}$ ) erfüllen muss. Die entsprechenden Wiederkehrintervalle sind in Tabelle 17 dargestellt.

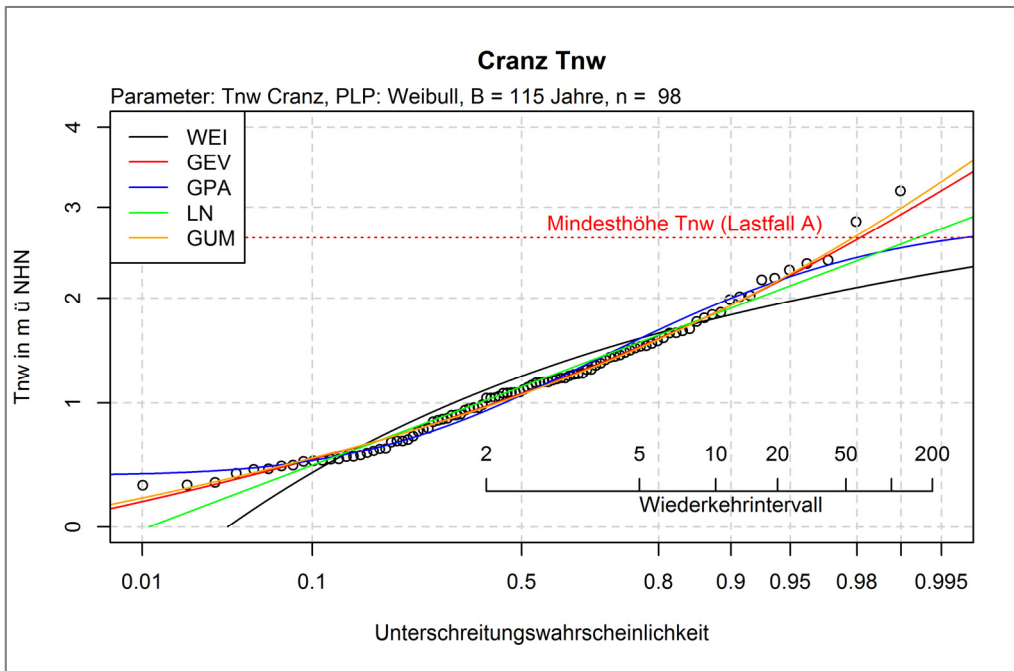


Abbildung 81: Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen an die Stichprobe der Jahresmaxima mit mindestens zwei Metern Windstau am Pegel Cranx nach der Este – Mündung

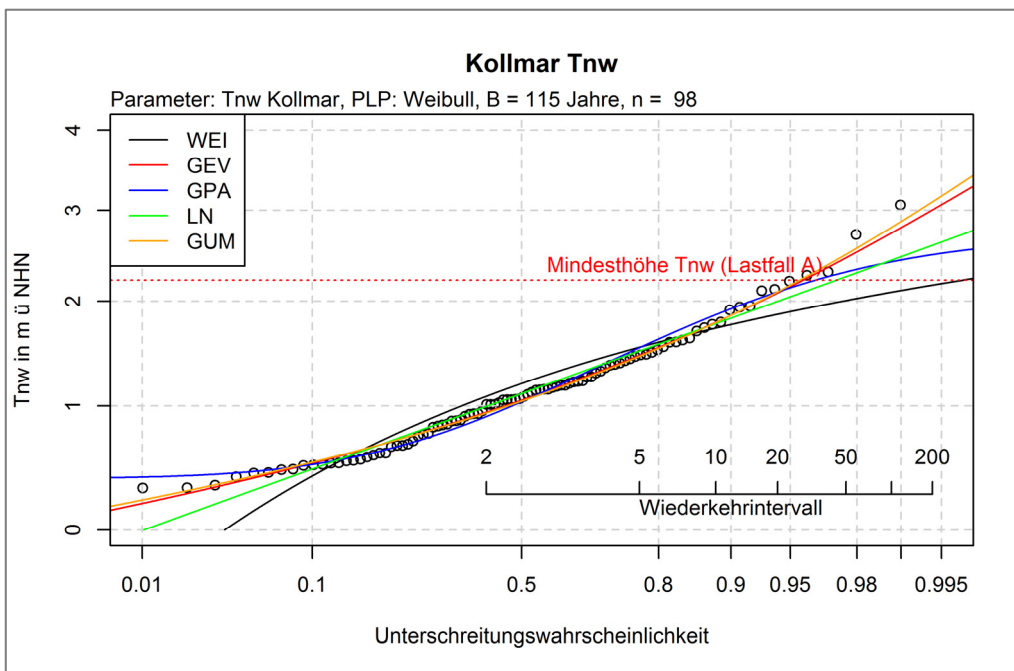


Abbildung 82: Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen an die Stichprobe der Jahresmaxima mit mindestens zwei Metern Windstau am Pegel Kollmar nach der Krückau – Mündung

Tabelle 17: Wiederkehrintervall der Tnw-Mindesthöhe im Lastfall A (HQ<sub>5</sub> plus 60% Schöpfwerksleistung, ein gesperrtes Tnw)

Pegel / Fluss	Wiederkehrintervall
Cranz/Este	55 Jahre
Kollmar/ Krückau	25 Jahre

#### 4.3.2.4 Bivariate Untersuchungen (Lastfall B)

Um Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens zweier hoher Tnw in Folge zu treffen, muss die gemeinsame Wahrscheinlichkeit beider Ereignisse ermittelt werden. Im Rahmen der Untersuchungen erfolgte dies mit der Hilfe von Copula Funktionen. Diese basieren auf dem Theorem von *SKALR* (Nelsen 2006). Mit ihnen lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Zufallsvariablen mit beliebigen Randverteilungen beschreiben. Copula Funktionen wurden in den letzten Jahren auch im Rahmen hydrologischer Fragestellungen eingesetzt, u.a. von (Wahl et al. 2011) und (Salecker et al. 2012). In den Veröffentlichungen sind neben der Methodik auch die Anwendungsfälle auf hydrologische Daten erläutert.

Im vorliegenden Fall existiert für jeden Pegel (Cranz und Kollmar) eine Stichprobe mit je zwei Parametern (Tnw 1 und Tnw) und insgesamt 84 Werten. Das Kriterium für die Aufnahme in die Stichprobe ist für beide Ereignisse (Tnw 1 und Tnw) ein Windstau von mindestens zwei Metern. An die Werte jedes Parameters wurden zunächst Extremwertverteilungen angepasst. Die Anpassung erfolgte mit Hilfe der Methode der L-Momente. Auf der Grundlage der Darstellung der Stichproben (PLP Weibull) wurde in beiden Fällen die GEV als beste Anpassung ausgewählt.

Auf der Grundlage der beiden Randverteilungen und dem Abhängigkeitsparameter  $\theta$ , der zuvor für ausgewählte Copula Funktionen ermittelt wurde, werden 10.000 Ereigniskombinationen simuliert und zusammen mit den gemessenen Werten dargestellt. Aus der visuellen Einschätzung geht hervor, dass für die Stichproben an beiden Pegeln die *Joe Copula* die gemessenen Daten am besten beschreibt.

In Abbildung 83 und Abbildung 84 sind die Stichproben sowie die auf der Grundlage der Randverteilungen und der angepassten Copula simulierten Datenpaare dargestellt. Jeder Tnw-Kombination kann ein Wiederkehrintervall zugeordnet werden. Werden Tnw – Kombinationen mit gleichem Wiederkehrintervall verbunden, entstehen Isolinien gleicher Wiederkehrintervalle. In den beiden Abbildungen sind Isolinien für die Wiederkehrintervalle 100, 500 und 1000 Jahre dargestellt. Außerdem ist der Bereich gekennzeichnet (rote Box), in dem die Tnw-Kombinationen ausreichend hoch sind, um den ausgewählten Lastfall (HQ<sub>5</sub>, 60% Schöpfwerkszufluss) zu erfüllen. Der rote Punkt in der linken unteren Ecke der Box ist das mit Hilfe des hydrodynamisch-numerischen Modells simulierte Wertepaar, das die Mindesthöhe der beiden Tnw darstellt. Die entsprechenden Wiederkehrintervalle sind in Tabelle 18 zusammengefasst. Die bestimmten Wiederkehrintervalle sind sehr hoch und übertreffen den in gängigen Merkblättern, u.a. (DVWK 1991; DWA 2012), empfohlenen maximalen Extrapolationszeitraum vom Dreifachen der Länge der Zeitreihe um ein Vielfaches. Da im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass die korrekte Verteilungsfunktion gefunden wurde, wird der Extrapolationszeitraum deutlich ausgedehnt, um die Größenordnung der Wiederkehrintervalle zu verdeutlichen. Gleichwohl ist zu beachten, dass die angegebenen Werte mit Unsicherheiten behaftet sein können.

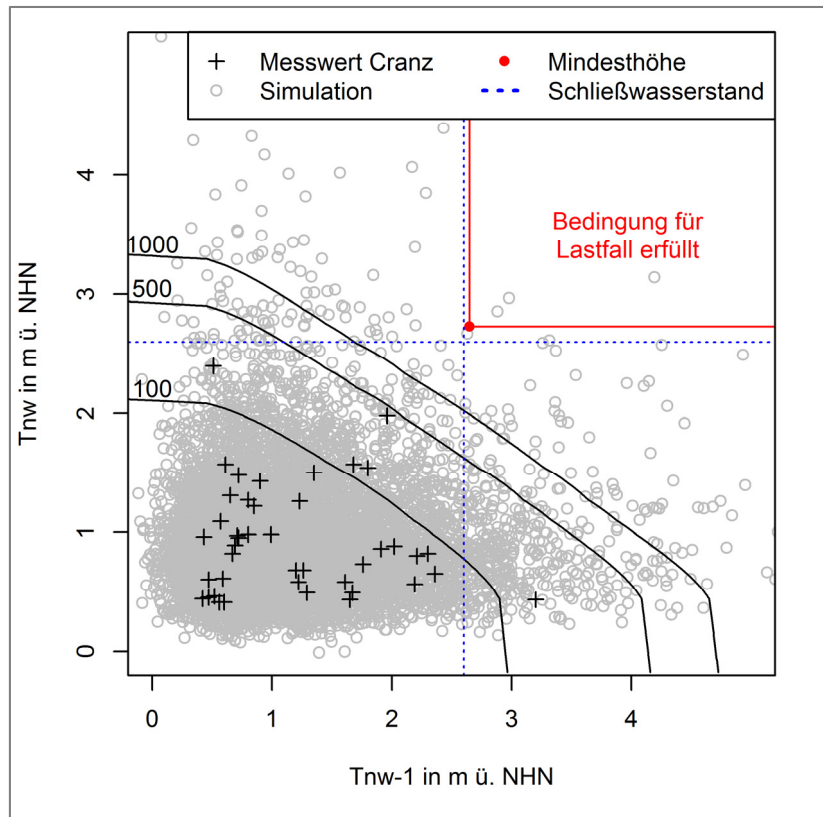


Abbildung 83: Gemessene und simulierte Datenpaare sowie Linien gleicher Wiederkehrintervalle für den Pegel Cranz

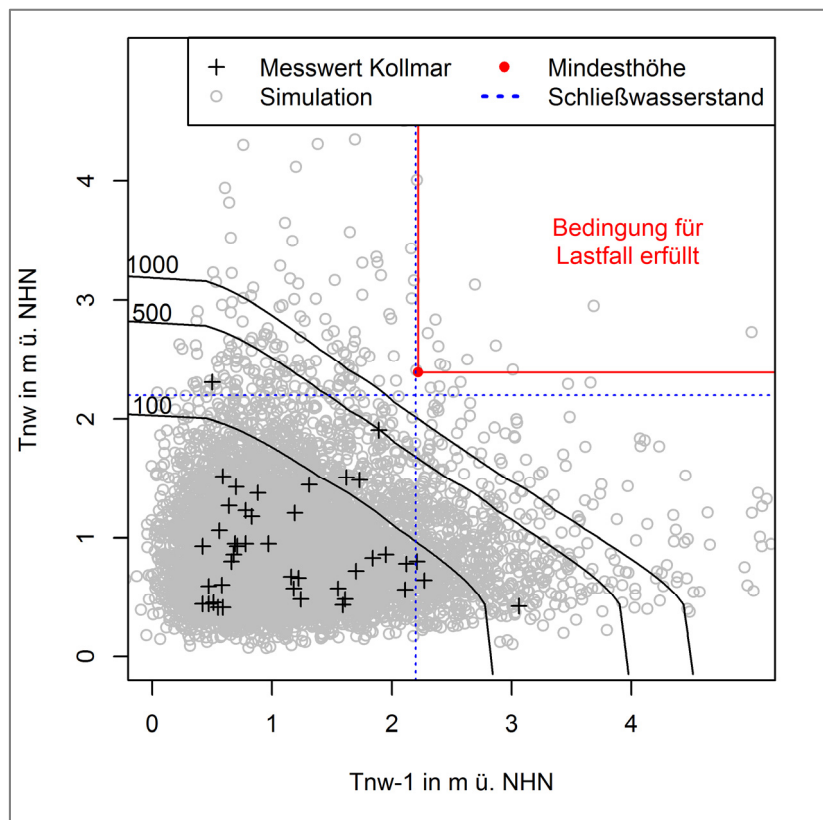


Abbildung 84: Gemessene und simulierte Datenpaare sowie Linien gleicher Wiederkehrintervalle für den Pegel Kollmar

**Tabelle 18: Wiederkehrintervall der Tnw – Kette, die die Kriterien des ausgewählten Lastfalls (HQ<sub>5</sub> plus 60% Schöpfwerksleistung bei zwei gesperrten Tnw) erfüllt**

Pegel / Fluss	Wiederkehrintervall Tnw - Kette
Cranz/Este	3100 Jahre
Kollmar/ Krückau	2135 Jahre

#### 4.3.2.5 Wiederkehrintervall der ausgewählten Lastfälle

Die Wiederkehrintervalle für die Lastfälle A und B ergeben sich aus dem Produkt der Wiederkehrintervalle der Einzelkomponenten. Das Wiederkehrintervall des Hochwasserereignisses bleibt der Annahme folgend bei fünf Jahren. Die Wiederkehrintervalle für ein bzw. zwei gesperrte Tnw in Folge stammen aus Tabelle 17 und Tabelle 18. Die Wiederkehrintervalle der Lastfälle A und B sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Insgesamt wird deutlich, dass die Kombination aus einem HQ<sub>5</sub> mit zwei gesperrten Tnw (Lastfall B) nur extrem selten auftritt. Für die Krückau beträgt es 10.675 Jahre. Für die Este beträgt es 15.500 Jahre. Der Unterschied ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die Wasserstände in der Krückau aufgrund des deutlich größeren Stauraumes viel kleiner sind als die Wasserstände in der Este.

**Tabelle 19: Wiederkehrintervalle der Lastfälle A und B**

Pegel / Fluss	HQ	Ein gesperrtes Tnw	Lastfall A	Zwei gesperrte Tnw	Lastfall B
	Jahre	Jahre	Jahre	Jahre	Jahre
Cranz/Este	5	55	275	3.100	15.500
Kollmar/ Krückau	5	25	125	2.135	10.675

## 4.4 Morphodynamik und morphologische Entwicklung der Unterläufe

Die Morphodynamik und die morphologische Entwicklung der Unterläufe der Nebenflüsse werden im Wesentlichen geprägt durch die Tide- und Schwebstoffdynamik der Elbe, den Binnenabfluss und die Schwebstoffzufuhr aus dem Einzugsgebiet sowie die Eigenschaften der Schwebstoffe und der Sohlsedimente. Ziele der nachfolgend dargestellten Untersuchungen sind die Beschreibung morphodynamischer Prozesse im Unterlauf tidebeeinflusster Nebenflüsse sowie die Beschreibung der morphologischen Entwicklung. Dies erfolgt auf der Grundlage von analysierten Messdaten und Modellergebnissen.

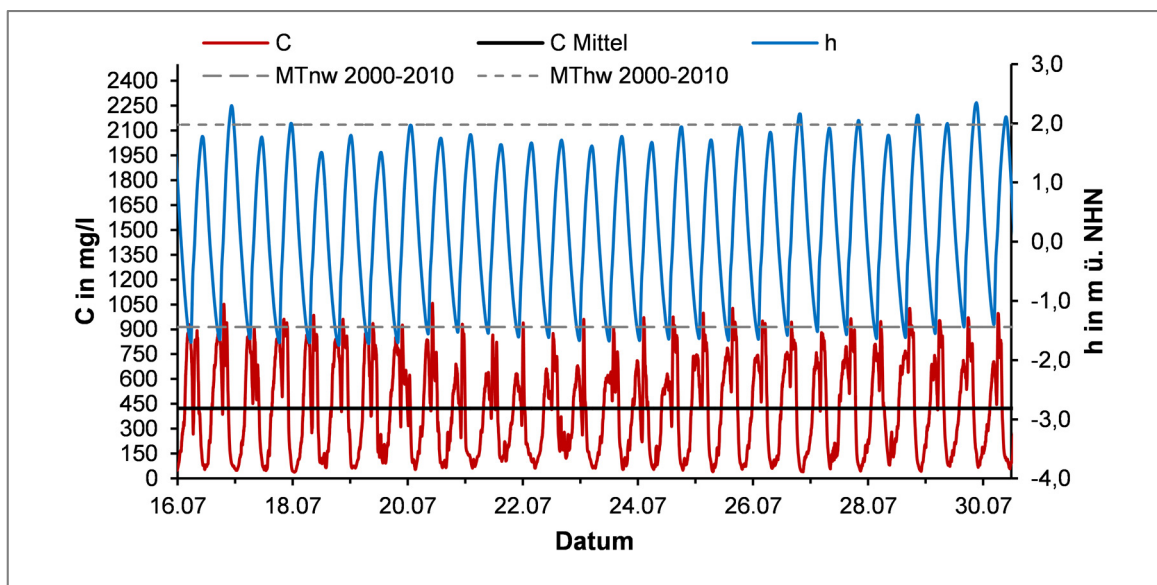
### 4.4.1 Sedimenttransport und Morphodynamik

Erste Untersuchungen zur morphodynamischen Entwicklung von tidebeeinflussten Nebenflüssen wurden von Donner am Beispiel der Krückau durchgeführt (Donner 2014). Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung eines Langzeitverfahrens zur Abschätzung morphologischer Veränderungen in tidebeeinflussten Flüssen. Die Ergebnisse und die Erkenntnisse hinsichtlich der Anforderungen an Mess- und Modelltechnik sind als Grundlage in die nachfolgenden Untersuchungen eingeflossen.

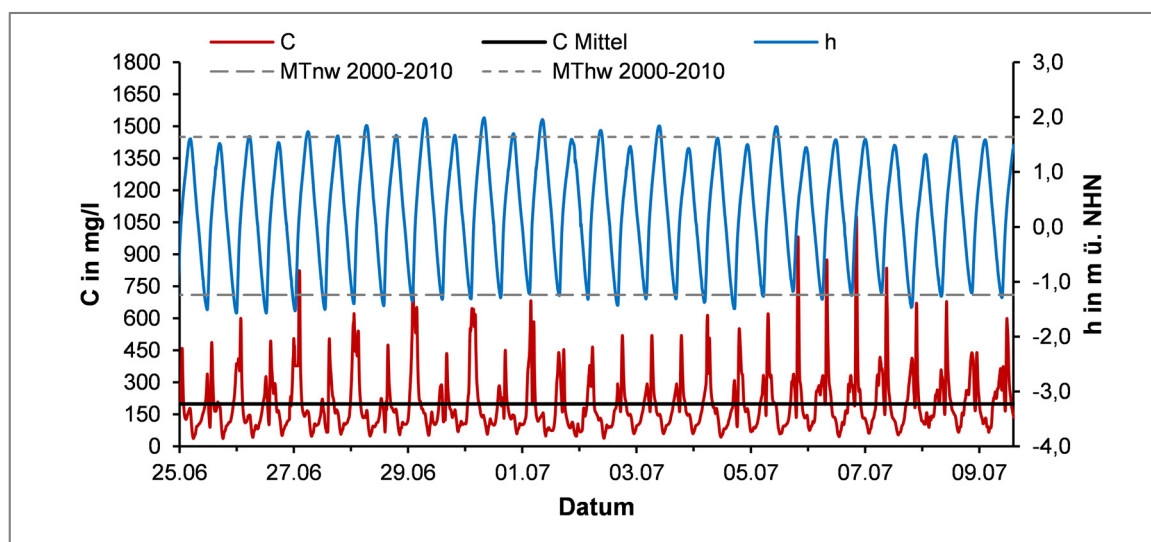
#### 4.4.1.1 Messergebnisse

Im Bereich der Mündungssperwerke von Este und Krückau wurden Messkampagnen im Zeitraum von Juni 2014 bis September 2014 durchgeführt. Während dieses Zeitraumes wurden Trübung und Wasserstand kontinuierlich aufgezeichnet. Abbildung 85 und Abbildung 86 zeigen die Ergebnisse für einen etwa zweiwöchigen Zeitraum (genau 28 Tiden). Die Ganglinie des Wasserstandes bewegt sich ohne größere Ausreißer im Bereich des langjährigen MThw bzw. MTnw, d.h. es herrschten in dem Zeitraum mittlere Tideverhältnisse. Im Verlauf der Ganglinie ist die tägliche Ungleichheit der Tiden deutlich zu erkennen. Am 27.06. sowie am 26.07. war Neumond (Springzeit). Am 05.07.2014 stand der Mond im ersten und am 19.07. im letzten Viertel (Nippzeit). Die höchsten bzw. niedrigsten Thw treten etwa zwei bis drei Tage nach den angegebenen Ereignissen auf, was durch die Spring- bzw. Nippverspätung zu erklären ist. Diese beträgt in der Deutschen Bucht etwa zwei bis drei Tage (Krauß und Berger 1961).

Wie der Wasserstand hat auch die Schwebstoffkonzentration einen Tideverlauf. Die Konzentration verläuft größtenteils antiproportional zum Wasserstand. Das Konzentrationsmaximum wird kurz nach Tnw und das Konzentrationsminimum kurz nach Thw erreicht. Innerhalb des vierzehntägigen Zeitraumes erreichen alle Minima in etwa die gleiche Größenordnung. Die Maxima streuen hingegen stärker. Besonders deutlich ist die Streuung in der Schwebstoffkonzentration der Krückau zu erkennen. Ein regelmäßiges Muster, wie z.B. „hohe Tnw gehen einher mit niedrigeren Konzentrationsmaxima“ o.ä., ist nicht zu identifizieren. Sollte es ein Muster geben, sind die Zeitreihen hierfür offensichtlich zu kurz. Möglich ist auch, dass die starken Schwankungen auf anthropogene Einflüsse, z.B. Schöpfwerksbetrieb oder Spülungen von Hafenbecken, zurückzuführen sind.



**Abbildung 85: Gemessener Verlauf der Schwebstoffkonzentration und des Wasserstandes am Äußeren Este-Sperrwerk, Messzeitraum 16.07.2014-30.07.2014**



**Abbildung 86: Gemessener Verlauf der Schwebstoffkonzentration und des Wasserstandes am Krückau-Sperrwerk, Messzeitraum 25.06.2014-10.07.2014**

Da die Abflüsse in der Elbe in den Monaten vor den Messkampagnen gering waren (unterhalb des langjährigen MQ), ist davon auszugehen, dass die Trübungszone der Tideelbe zum Zeitpunkt der Messungen in Richtung stromauf verschoben war (vgl. Abschnitt 3.3.3). Tabelle 20 zeigt die mittleren Schwebstoffkonzentrationen an den vier Dauermessstationen D1 bis D4 in der Elbe. Während der Messzeiträume war die Konzentration an Station D3, die sich in der Nähe der Krückau-Mündung befindet, am höchsten. Innerhalb des Messzeitraumes beträgt der Mittelwert an Station D3  $C = 220$  mg/l und entspricht damit nahezu dem Mittelwert in der Krückau  $C = 200$  mg/l. Indessen ergibt der Vergleich der mittleren Schwebstoffkonzentrationen an der Station D1, die sich nahe der Este – Mündung befindet, mit der mittleren Schwebstoffkonzentration in der Este eine große Differenz. Innerhalb des Messzeitraumes beträgt die mittlere Schwebstoffkonzentration an Station D1  $C = 89$  mg/l und in der Este  $C = 420$  mg/l. Damit ist die gemessene Schwebstoffkonzentration im Mündungsbereich der Este fast fünfmal größer als im Bereich der Messstation D1.

**Tabelle 20: Mittlere sohlnahe Schwebstoffkonzentration in der Elbe während der Messkampagnen in Este und Krückau (Daten: WSV)**

Kampagne	Zeitraum		D4	D3	D2	D1
			(km 676,5)	(km 664,7)	(km 651,3)	(km 643,0)
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Este	16.07.2014 - 30.07.2014	Sohle	238	275	232	115
		Oberfläche	93	88	105	62
		Mittelwert	166	181	169	89
Krückau	25.06.2014 - 09.07.2014	Sohle	259	331	212	183
		Oberfläche	90	108	106	70
		Mittelwert	174	220	159	126

Die große Abweichung kann mehrere Ursachen haben. Denkbare Ursachen sind die unterschiedlichen Messmethoden und –verfahren, die an den Dauermessstationen und bei den Messungen in den Nebenflüssen eingesetzt werden. Es ist jedoch wenig wahrscheinlich, dass die unterschiedlichen Messmethoden und –verfahren, die beide verifiziert wurden, zu derart großen Abweichungen führen. Ein weiteres Argument, das gegen diese These spricht, ist die gute Übereinstimmung der mittleren Konzentrationen in der Krückau und der Station D3. Eine Überprüfung der Erkenntnisse anhand eines

weiteren zweiwöchigen Zeitraumes führte für beide Flüsse zum selben Resultat. Daher spricht vieles dafür, dass lokale Effekte in der Elbe zwischen der Dauermessstation D1 und dem Äußeren Estesperrwerk einen großen Einfluss auf die Schwebstoffkonzentration ausüben. In Frage kommen beispielsweise Prozesse im Bereich der Wattflächen des Mühlenberger Lochs. Diese werden von dem Wasser, das aus der Elbe in die Este strömt, passiert. Auf den Wattflächen sedimentieren während jeder Tide Schwebstoffe. Teile der frisch abgelagerten Sedimente werden bei einsetzender Flut wieder remobilisiert und können zu derart hohen Konzentrationen in der Este führen.

Für die weiteren Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die analysierten Zeitreihen repräsentativ sind für die vorherrschenden Rahmenbedingungen in der Unterelbe (mittlere Tideverhältnisse, Trübungszone in Richtung stromauf verschoben). Abbildung 87 und Abbildung 88 zeigen die überlagerten Ganglinien der Einzeltiden sowie die Mittelwerte aus allen 28 Tiden. Außerdem sind der über alle Tiden gemittelte Wasserstand und die dazugehörige Fließgeschwindigkeit dargestellt. Da letztere während der Messkampagnen nicht erfasst wurde, handelt es sich beim dargestellten Verlauf um ein Ergebnis aus der hydrodynamisch-numerischen Modellierung.

Der Vergleich der Ganglinien für Krückau und Este zeigt viele Gemeinsamkeiten und einige deutliche Unterschiede. Beide Wasserstandskurven zeigen erwartungsgemäß den für Ästuar typischen asymmetrischen Verlauf mit einer kürzeren Flutstromphase und einer längeren Ebbstromphase (vgl. Abschnitt 3.3.1). Auffällig ist jedoch der deutliche Steigungswechsel etwa 50 Minuten nach Tnw in der Wasserstandsganglinie der Este. Diese Auffälligkeit ist auch im Verlauf der Fließgeschwindigkeiten erkennbar. Während die Strömungsgeschwindigkeit in der ersten halben Stunde nach Tnw sehr schnell zunimmt, verlangsamt sich die Strömung nach einer halben Stunde deutlich. Erst nach dem Knick (~ Minute 70) steigt die Strömungsgeschwindigkeit wieder deutlich an. In den Ganglinien der Krückau ist keine derartige Auffälligkeit erkennbar. Ansonsten sind die Verläufe der Ebbstromgeschwindigkeiten im Mündungsbereich beider Flüsse ähnlich. Insgesamt sind die Fließgeschwindigkeiten der Krückau etwas höher als in der Este. In beiden Fällen ist die maximale Ebbstromgeschwindigkeit etwas kleiner als die maximale Flutstromgeschwindigkeit.

Die Verläufe der Schwebstoffkonzentrationen an beiden Flüssen folgen bei Flut (inkl. der Stauwasserzeiten) dem Verlauf der Fließgeschwindigkeit mit einem leichten Zeitversatz. Dieser ist nach Davis von der Wassertiefe, der Partikelgröße und der Reaktion von feinen Sedimenten auf die Tideströmungen abhängig (Davis 1985). Nach Postma deutet ein Zeitversatz auf das Vorherrschen kohäsiver Sedimente mit geringen Sinkgeschwindigkeiten hin (Postma 1980).

Grundsätzlich lassen sich in den Verläufen fünf Phasen unterscheiden.

Phase eins beginnt beim Tnw. Zu diesem Zeitpunkt hat die Schwebstoffkonzentration ein lokales Maximum und fällt innerhalb von ca. 75 Minuten auf ein lokales Minimum ab. Diese Abnahme ist auf das Absinken der Schwebstoffe zur Stauwasserzeit um die Ebbstromkenterung zurückzuführen.

In Phase zwei steigt die Konzentration innerhalb von 45 Minuten stark auf das absolute Maximum der Kurve an. Diese starke Zunahme ist auf den raschen Anstieg der Fließgeschwindigkeit zurückzuführen, der zu einer Re-Suspension von Sedimenten führt. Ein Teil dieser Sedimente wurde im vorangegangenen Tidezyklus auf den Watten abgelagert. Da diese vergleichsweise frisch abgelagert sind, ist deren Erosionswiderstand noch nicht so groß wie der von länger gelagertem Material, das bereits teilweise konsolidiert ist. Je größer die Watten, desto mehr Material steht zur Re-Suspension zur Verfügung.

In der Phase drei fällt die Schwebstoffkonzentration wieder ab. Diese unterscheidet sich in den beiden Flüssen am deutlichsten. In der Krückau fällt die Konzentration innerhalb von 60 Minuten rapide ab. Da die Fließgeschwindigkeit nur geringfügig zurückgeht, müssen weitere Effekte, wie z.B. die Verdünnung durch zuströmendes Wasser mit geringerem Schwebstoffgehalt oder auch die Bildung von Flocken für den Rückgang der Schwebstoffkonzentration verantwortlich sein. In der Este dauert die Phase doppelt so lange an (120 Minuten). Dabei ist der Rückgang der Konzentration deutlich geringer.

In Phase vier fällt die Schwebstoffkonzentration auf das absolute Minimum der Kurve ab. Dies ist auf das Absinken der Schwebstoffe zur Stauwasserzeit um die Flutstromkenterung zurückzuführen. Da die Dauer der Stauwasserzeit länger ist als jene um die Ebbstromkenterung, haben Schwebstoffe mehr Zeit, um zu sedimentieren. Dementsprechend sinkt die Konzentration auf einen Wert ab, der niedriger ist als zur Stauwasserzeit um die Flutstromkenterung. Die Größenordnung der minimalen Konzentration liegt an beiden Flüssen im Bereich von  $C = 75 \text{ mg/l}$ . Durch das höhere Grundniveau ist der Rückgang der Konzentration in der Este deutlich stärker als in der Krückau. Zudem ist die Dauer dieser Phase in der Este (140 Minuten) rund 60 Minuten kürzer als in der Krückau (200 Minuten).

In Phase fünf steigt die Schwebstoffkonzentration langsam an und erreicht innerhalb von 360 Minuten den Ausgangswert von Phase eins. Im Gegensatz zu den vier vorherigen Phasen verläuft die Schwebstoffkonzentration in dieser Phase entgegen dem Verlauf der Fließgeschwindigkeit. Obwohl die Ebbstromgeschwindigkeit fast die gleiche Größenordnung hat, wie die Flutstromgeschwindigkeit, steigt die Schwebstoffkonzentration nur langsam an. Eine Erklärung hierfür ist der *scour lag* (Kapitel 3.3.3).

In den ersten drei Phasen ist die Streuung innerhalb des Kollektivs der Einzeltiden sehr groß. Diese große Bandbreite kann neben einer natürlichen Ursache auch durch andere Effekte entstanden sein, wie z.B.:

- das Messverfahren, bei dem die Umrechnung der Trübung in eine Konzentration mittels einer linearen Beziehung erfolgt, wodurch implizit eine über den Messzeitraum homogene Zusammensetzung der suspendierten Partikel angenommen wird, was nicht zwangsläufig gegeben ist,
- den Messaufbau, der durch die Anordnung der Trübungssonde auf dem Prinzip einer Einpunktmessung in Sohlnähe beruht, wodurch lokale Effekte wie z.B. kleine Wolken höherer Schwebstoffkonzentration zu großen Abweichungen führen können oder
- anthropogene Effekte, wie z.B. häufiger Spülbetrieb im nahe am Sperrwerk gelegenen Dockhafen bei Ebbstrom.

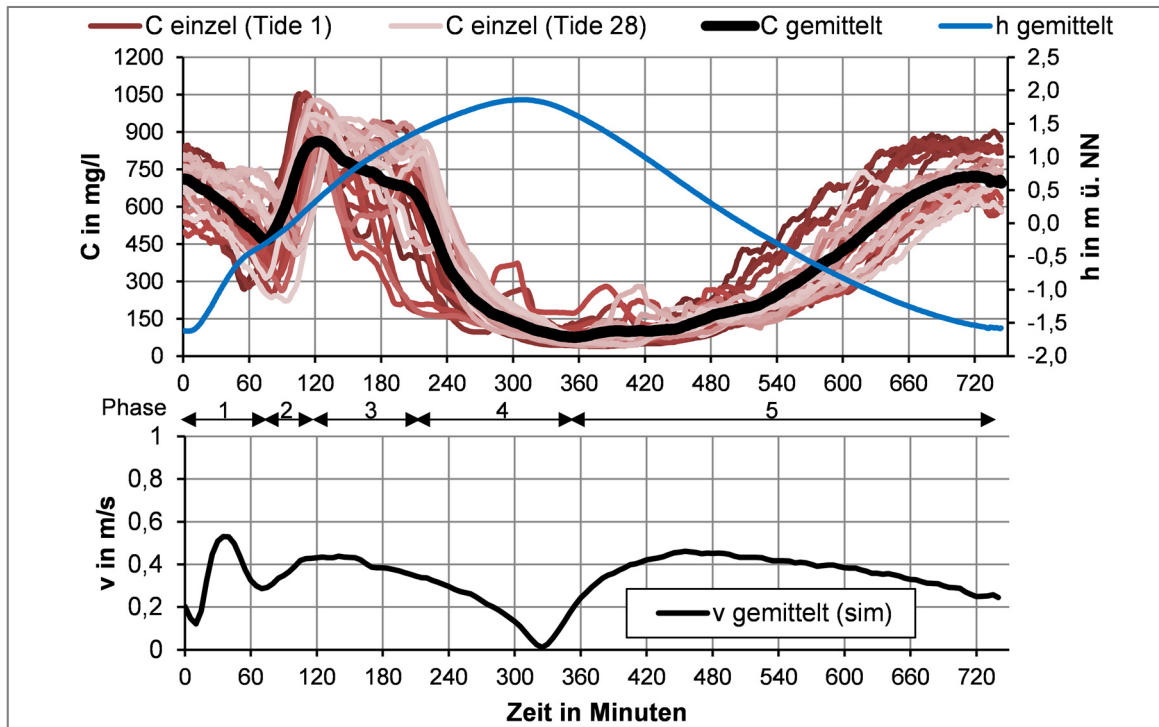


Abbildung 87: Oben: In der Este gemessene Schwebstoffkonzentration der Einzeltiden, gemittelte Schwebstoffkonzentration, gemittelter Wasserstand; unten: simulierte Fließgeschwindigkeit für gemittelten Wasserstandsverlauf

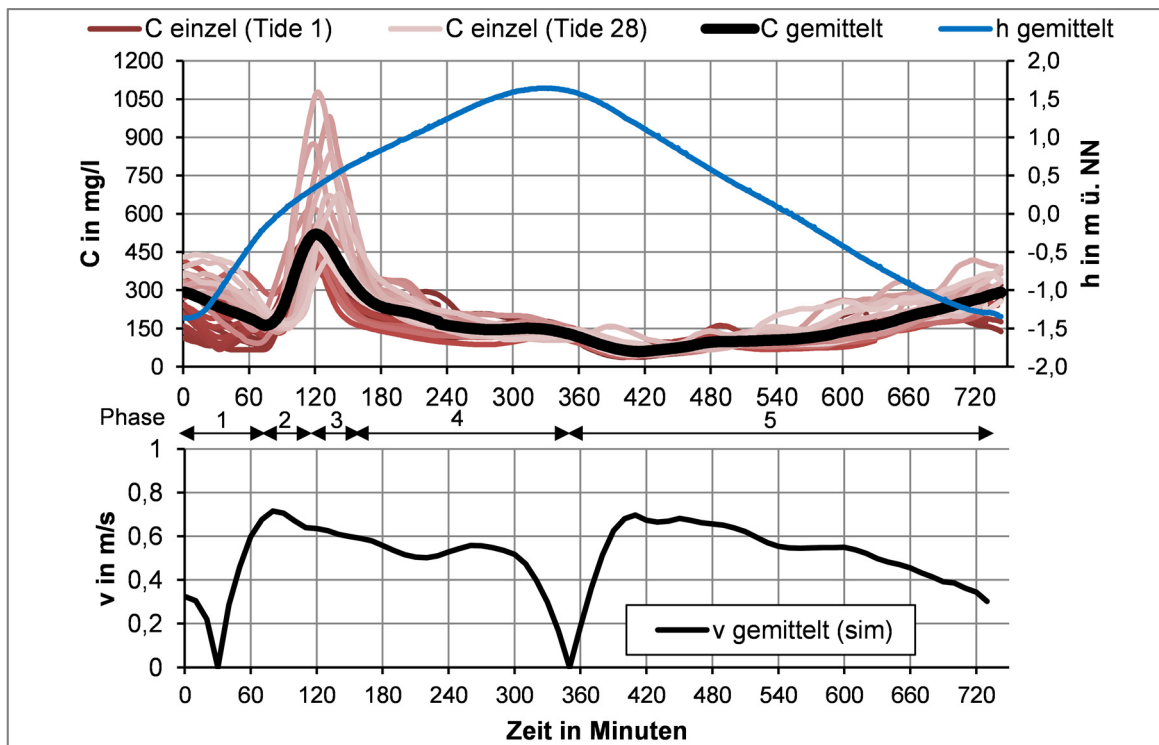
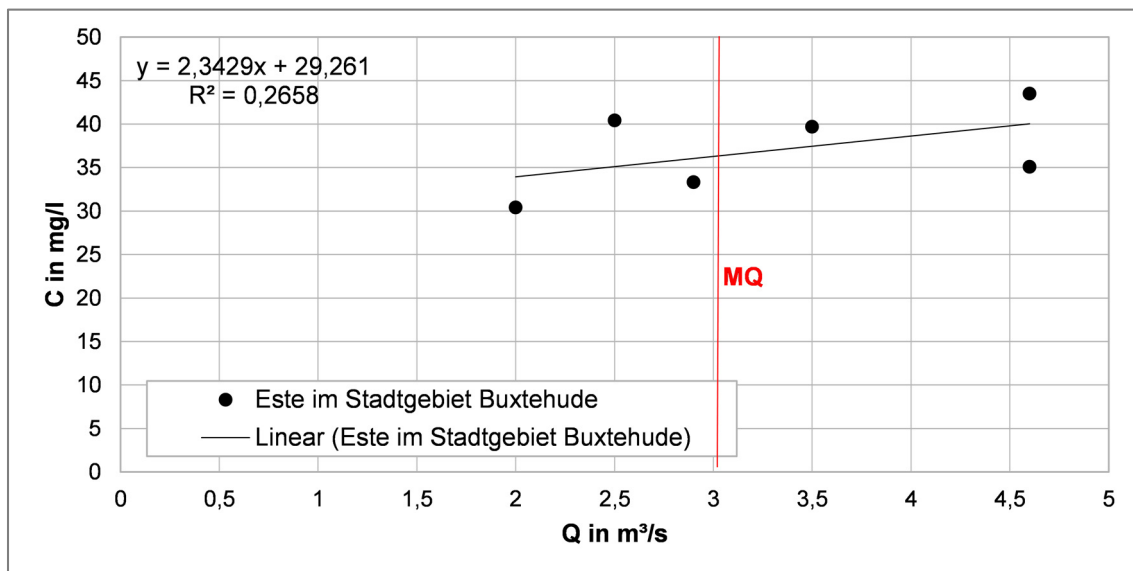


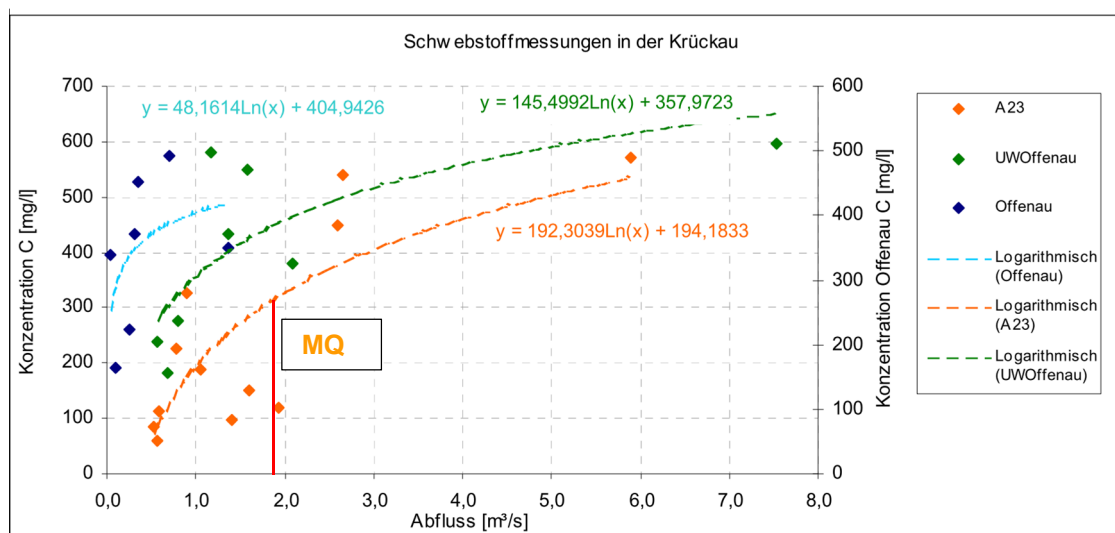
Abbildung 88: Oben: In der Krückau gemessene Schwebstoffkonzentration der Einzeltiden, gemittelte Schwebstoffkonzentration, gemittelter Wasserstand; unten: simulierte Fließgeschwindigkeit für gemittelten Wasserstandsverlauf

Oberhalb der Tidegrenze wurden ebenfalls Messungen der Schwebstoffkonzentration durchgeführt. In der Este erfolgten Messungen des Abflusses und der Schwebstoffkonzentration (Schöpfproben). Die Ergebnisse sowie der ermittelte funktionale Zusammenhang sind in Abbildung 89 dargestellt.



**Abbildung 89: Gemessene Schwebstoffkonzentrationen und Abflüsse in der Este im Stadtbereich Buxtehude und ermittelter funktionaler Zusammenhang zwischen Abfluss und Schwebstoffkonzentration**

Für die Krückau und deren Nebenfluss Offenau wurden funktionale Zusammenhänge zwischen Abfluss und Schwebstoffkonzentration (Abbildung 90) durch Donner ermittelt (Donner 2014). Der Vergleich der Schwebstoffkonzentrationen bei mittlerem Abfluss (MQ) zeigt, dass die Schwebstoffkonzentration am Pegel A23/Krückau ( $C = 300 \text{ mg/l}$ ) rund neunmal höher ist als die Schwebstoffkonzentration der Este im Bereich des Stadtgebietes von Buxtehude ( $C = 35 \text{ mg/l}$ ).



**Abbildung 90: Gemessene Schwebstoffkonzentrationen und Abflüsse im Oberlauf an drei Messprofilen und ermittelte funktionale Zusammenhänge zwischen Abfluss und Schwebstoffkonzentration (aus Donner 2014)**

#### 4.4.1.2 Modellergebnisse

Aus den erhobenen Schwebstoff- und Wasserstandsdaten werden Randbedingungen für die numerischen Simulationsrechnungen abgeleitet. Mit Hilfe der Modellierung werden die punktuell an den Modellrändern erhobenen Daten auf den gesamten Unterlauf übertragen.

Zunächst werden ausgewählte Ergebnisse der Modellierung für den Unterlauf der Este dargestellt. Abbildung 91 zeigt die simulierte mittlere Schwebstoffkonzentration unterteilt nach Flutstrom ( $C_{\text{Flut}}$ ) und Ebbstrom ( $C_{\text{Ebb}}$ ) sowie das Verhältnis der beiden Konzentrationen. Die höchsten Konzentrationen treten zwischen dem Äußeren (km 12,5) und dem Inneren Este-Sperrwerk (km 11) auf. Die Konzentration bei Flutstrom beträgt im Maximum  $C_{\text{Flut}} = 550 \text{ mg/l}$  und ist damit etwa 30% höher (F:E  $\sim 1,3$ ) als die Konzentration bei Ebbstrom  $C_{\text{Ebb}} = 425 \text{ mg/l}$ . Die Bandbreite, die die Variation innerhalb der betrachteten 28 Tiden darstellt, ist bei Flutstrom ( $\sim 330 \text{ mg/l}$ ) ebenfalls größer als bei Ebbstrom ( $\sim 270 \text{ mg/l}$ ).

Zwischen km 11,0 und km 4,0 nehmen  $C_{\text{Flut}}$  und  $C_{\text{Ebb}}$  kontinuierlich auf etwa  $35 \text{ mg/l}$  ab. Das Verhältnis  $C_{\text{Flut}} / C_{\text{Ebb}}$  bleibt zwischen km 11,0 und km 6,0 in etwa konstant. Erst zwischen km 6,0 und km 4,0 nimmt die Schwebstoffkonzentration des Flutstromes schneller ab als die Konzentration des Ebbstromes. Bei km 4,0 ist  $C_{\text{Flut}}$  nur noch geringfügig größer als  $C_{\text{Ebb}}$ . Die Bandbreite wird ebenfalls kontinuierlich kleiner. Dabei ist die Bandbreite bei Flutstrom auch weiterhin größer als bei Ebbstrom. Zwischen km 4,0 und km 0,0 verlaufen die Schwebstoffkonzentrationen konstant auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau von etwa  $C = 35 \text{ mg/l}$ , was in etwa der Konzentration entspricht, die am oberen Modellrand eingesteuert wird ( $C = 30 \text{ mg/l}$ ). Die Bandbreite in diesem Abschnitt ist sehr gering.

Insgesamt wird an den dargestellten Ergebnissen die dämpfende Wirkung der Este auf die einströmende Schwebstoffkonzentration deutlich. Die starken Schwankungen der einströmenden Schwebstoffkonzentration werden innerhalb der Este abgebaut, wodurch eine gleichmäßigere ausströmende Konzentration entsteht. Die Pufferung findet zwischen km 12,5 und km 4,0 statt, wobei der Großteil im Bereich nahe der Mündung (km 12,5 – km 10,0) erfolgt.

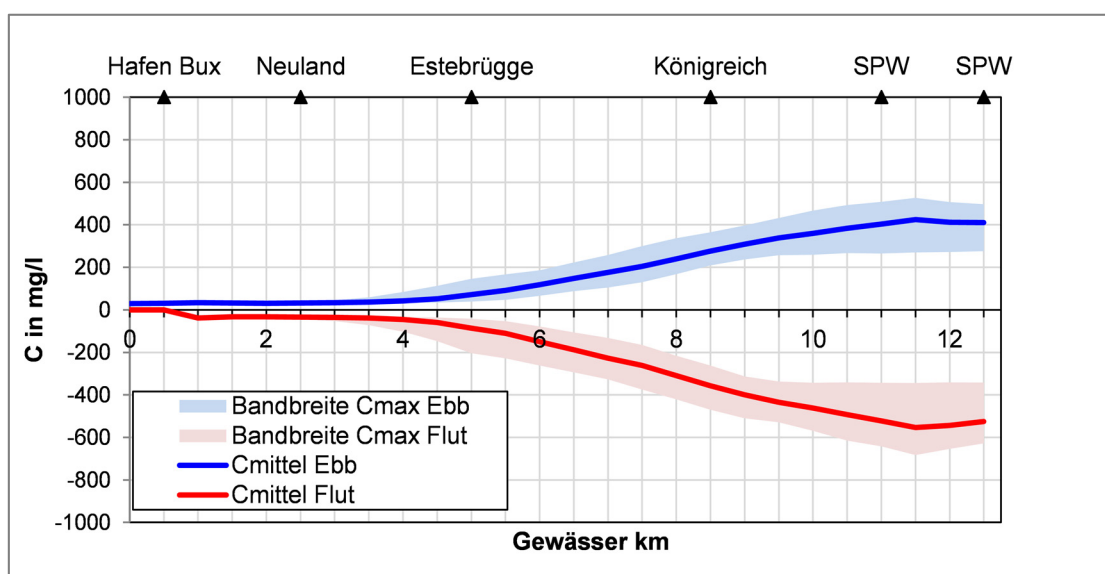
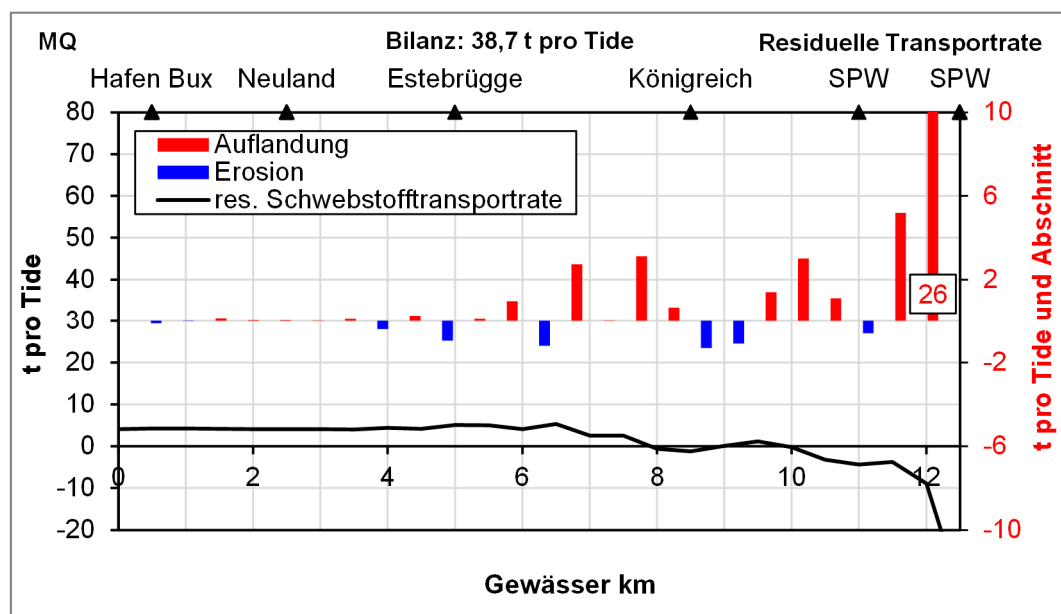


Abbildung 91: Mittlere Schwebstoffkonzentration im Unterlauf der Este bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)

Aus dem Produkt der Schwebstoffkonzentration  $C$  mit dem Abfluss  $Q$  ergibt sich die Schwebstofftransportrate. Summiert man diese über die Tidedauer auf und berücksichtigt dabei ein wechselndes Vorzeichen zwischen Ebb- und Flutstrom, ergibt sich die residuelle Transportrate pro Tide. Diese gibt darüber Aufschluss, wieviel Sediment innerhalb einer Tide in Richtung des Ebb- bzw. des Flutstromes transportiert wird. Nimmt die residuelle Transportrate innerhalb eines betrachteten Abschnittes zu, bedeutet dies, dass innerhalb dieses Abschnittes im Mittel eine Erosion stattfindet. Nimmt die residuelle Transportrate ab, dann kommt es im Mittel zur Auflandung.

In Abbildung 92 ist die residuelle Transportrate im Unterlauf der Este dargestellt. Außerdem ist deren Änderung innerhalb definierter Abschnitte von 500 m Länge ( $L = 500$  m) dargestellt. Insgesamt werden unter den angenommenen Rahmenbedingungen (MQ, mittlere Tideverhältnisse) im Mittel rund 38,7 t Material pro Tide importiert. Ein Großteil davon wird zwischen km 12,5 und km 10,0 abgelagert. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt um das Innere Este-Sperrwerk, in dem eine leichte Erosion auftritt. Zwischen km 10,0 und km 4,0 sind sowohl Abschnitte mit überwiegender Erosion als auch Abschnitte mit überwiegender Auflandung zu erkennen. In den Bereichen Königreich (km 9,0), Klein Hove (km 6) und Estebrücke (km 5) tritt abschnittsweise Erosion auf. Die Abschnitte dazwischen verlanden tendenziell. Insgesamt sind die Abschnitte in diesem Bereich weniger aktiv als jene nahe der Mündung. Zwischen km 4,0 und 0,0 treten kaum Änderungen der residuellen Transportrate auf. Demzufolge ist die Este in diesem Bereich morphologisch stabil.



**Abbildung 92: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)**

Um die Größenordnungen der abgelagerten Mengen besser einordnen zu können, ist es sinnvoll, die Gesamtmengen, die während einer Tide transportiert werden, zu betrachten und das Verhältnis aus transportierter Gesamtmenge zu abgelagerter Menge zu bilden. Aus Abbildung 93 geht hervor, dass im Bereich des Äußeren Este-Sperrwerks (km 12,5) rund 1.250 t pro Tide (600 t mit dem Ebbstrom, 650 t mit dem Flutstrom) transportiert werden. Die 26 t (vgl. Abbildung 92), die pro Tide in diesem Abschnitt abgelagert werden, entsprechen rund zwei Prozent der Gesamtmenge.

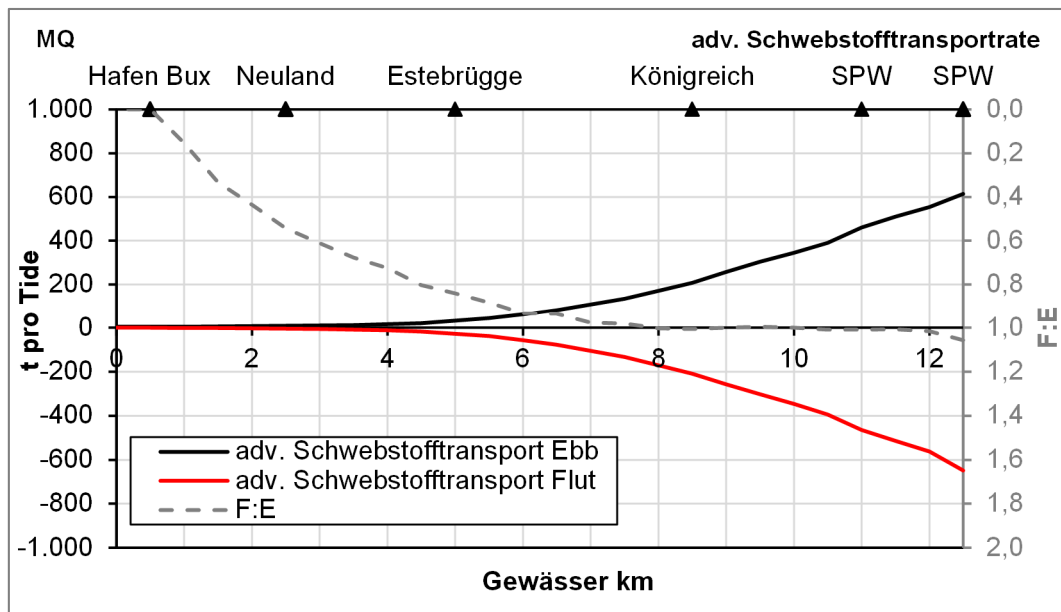


Abbildung 93: Advektive Schwebstofftransportraten des Ebb- und des Flutstromes im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)

Im Folgenden werden einige charakteristische Abschnitte detaillierter betrachtet. Abbildung 94 zeigt die simulierte Sohländerungen im Bereich von km 10,5. Es wird deutlich, dass es vor allem im Bereich der Böschungen und in den seitlichen Hafenbecken beziehungsweise Sielzuläufen zu deutlichen Verlandungen kommt. Im Bereich der Fahrrinne ändern sich die Sohlhöhen innerhalb des Simulationszeitraumes nicht wesentlich. Die 3 t Material (vgl. Abbildung 92), die in diesem Abschnitt abgelagert werden, verteilen sich also im Wesentlichen auf die Böschungen und Seitenbereiche.

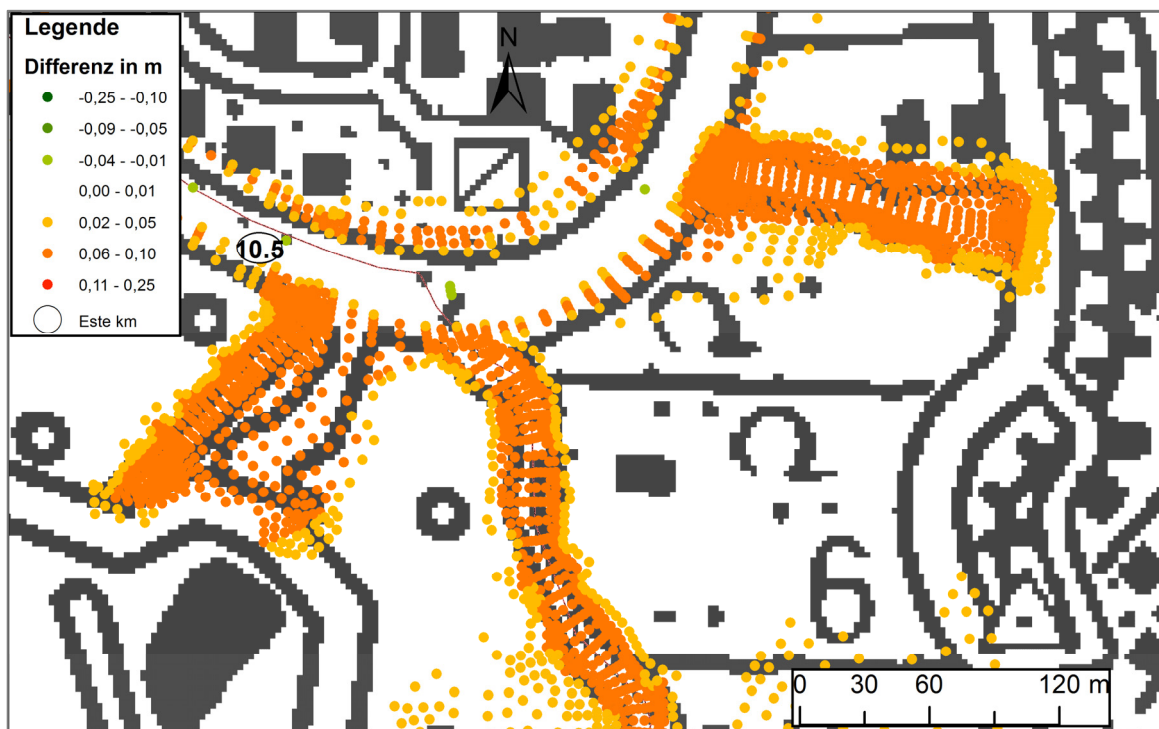
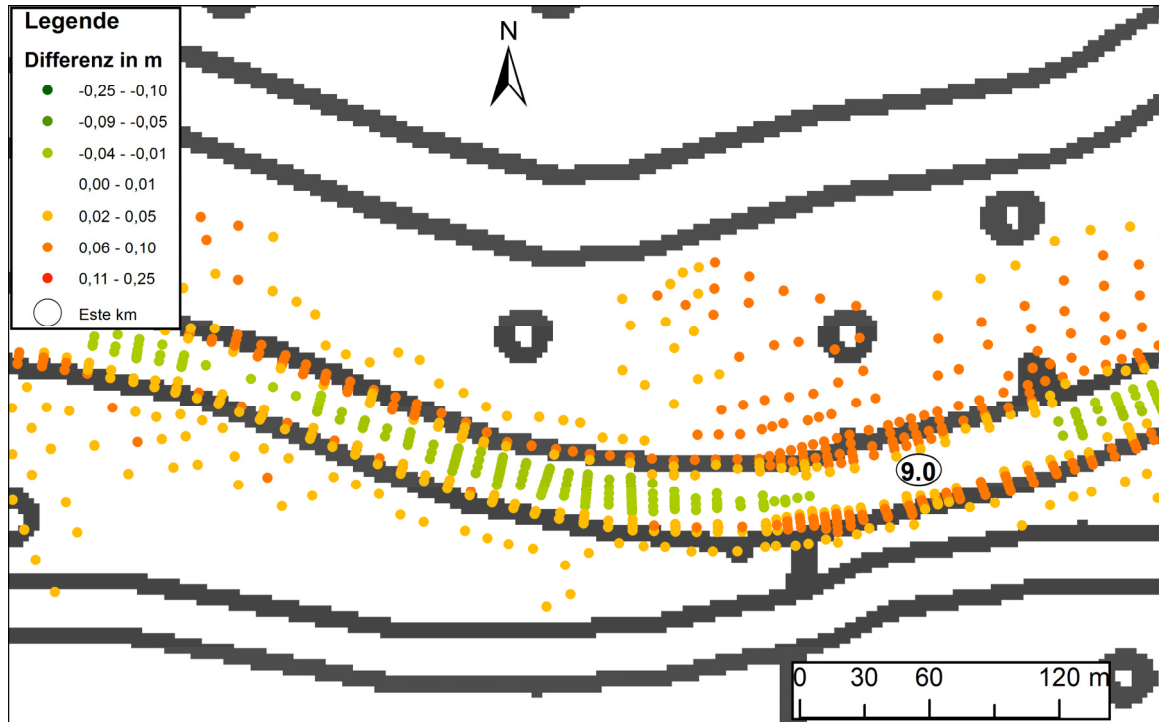


Abbildung 94: Simulierte Sohländerungen im Unterlauf der Este bei km 10,5 bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)

Abbildung 95 zeigt die simulierten Sohländerungen im Bereich von km 9,0. Wie zuvor dargestellt überwiegt in diesem Abschnitt die Erosion. Bei der Bilanzierung (Abbildung 92) wird nicht deutlich, dass es trotzdem zu Verlandungen im Bereich der Böschungen und des Vorlandes kommt. Das Gesamtvolumen des abgelagerten Materials ist jedoch kleiner als das Volumen des Materials, das in der Fahrrinne erodiert wird, weshalb sich für den Abschnitt im Mittel eine Erosionstendenz ergibt.



**Abbildung 95: Simulierte Sohländerungen im Unterlauf der Este bei km 9,0 bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)**

Die dargestellten Ergebnisse sind beispielhaft für den gesamten Unterlauf der Este. Hierfür lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen:

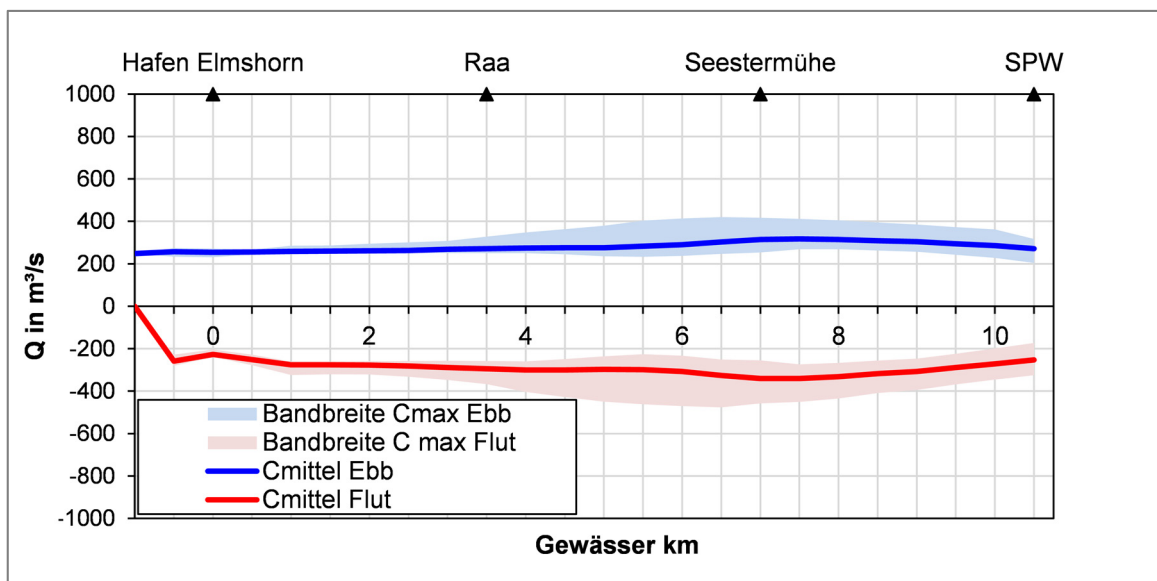
- i) Böschungen im gesamten Unterlauf verlanden, zwischen km 12,5 und km 4,0 ist die Verlandungstendenz vergleichsweise stark, zwischen km 4,0 und 0,5 gering
- ii) Vorländer, die regelmäßig überflutet werden, verlanden
- iii) Aufweitungen (Abschnitt zwischen den Sperrwerken, seitliche Hafenbecken, Siel-/Schöpfwerkszuläufe) verlanden stark
- iv) Fahrrinne ist meist stabil, Ausnahmen:
  - a. Sehr starke Verlandung im Bereich des Äußerem Este-Sperrwerks
  - b. Abschnittsweise Erosion, vor allem im Bereich von Einschnürungen und starken Krümmungen

Analog zu den Darstellungen für die Este werden im Folgenden ausgewählte Ergebnisse für den Unterlauf der Krückau dargestellt. Abbildung 96 zeigt die simulierte mittlere Schwebstoffkonzentration für den Flutstrom ( $C_{\text{Flut}}$ ) und den Ebbstrom ( $C_{\text{Ebb}}$ ) sowie das Verhältnis der beiden Konzentrationen. Der Längsschnitt der mittleren Schwebstoffkonzentration weist prinzipiell

die gleiche Charakteristik auf, wie sie in (Donner 2014) beschrieben ist. Die geringen Unterschiede sind auf unterschiedliche Randbedingungen<sup>16</sup> zurückzuführen.

Insgesamt ist der Verlauf der mittleren Konzentration innerhalb des Simulationszeitraumes sowohl bei Flut- als auch bei Ebbstrom homogen. Im Bereich des Sperrwerks ist die Konzentration bei Ebbstrom höher ( $C_{\text{Ebb}} = 275 \text{ mg/l}$ ) als bei Flutstrom ( $C_{\text{Flut}} = 250 \text{ mg/l}$ ). Die Bandbreite beträgt bei Flutstrom etwa  $150 \text{ mg/l}$  und bei Ebbstrom etwa  $125 \text{ mg/l}$ . Zwischen Sperrwerk (km 10,5) und Seestermühe (km 7,0) steigt die mittlere Konzentration weiter an. Das Maximum bei km 7,0 beträgt  $C_{\text{Flut}} = 350 \text{ mg/l}$  und ist damit etwa 8% größer ( $F:E \sim 1,08$ ) als  $C_{\text{Ebb}} = 320 \text{ mg/l}$ . Die Bandbreite nimmt in Richtung stromauf ebenfalls zu. Die maximalen Bandbreiten treten bei km 6,0 auf. Dabei ist die Bandbreite bei Flutstrom ( $\sim 240 \text{ mg/l}$ ) weiterhin größer als bei Ebbstrom ( $\sim 175 \text{ mg/l}$ ).

Zwischen km 7,0 und km 0,0 nehmen  $C_{\text{Flut}}$  und  $C_{\text{Ebb}}$  leicht auf etwa  $250 \text{ mg/l}$  ab. Das Verhältnis  $C_{\text{Flut}} / C_{\text{Ebb}}$  bleibt zwischen km 7,0 und km 1,0 in etwa konstant. Erst im Bereich des Elmshorner Hafens (km 1,0 - km 0,0) nimmt die Schwebstoffkonzentration des Flutstromes schneller ab als die Konzentration des Ebbstromes, was dazu führt, dass  $C_{\text{Ebb}}$  im Bereich des Elmshorner Hafens größer ist als  $C_{\text{Flut}}$ . Die Bandbreite ist zwischen km 7,0 und km 5,0 sehr groß und nimmt zwischen km 5,0 und km 0,0 deutlich ab. Es bleibt dabei, dass die Bandbreite bei Flutstrom weiterhin größer ist als bei Ebbstrom. Insgesamt wird an den dargestellten Ergebnissen deutlich, dass die Krückau unter den gegebenen Rahmenbedingungen keine dämpfende Wirkung auf die einströmende Schwebstoffkonzentration hat. Die Konzentration bei Ebbstrom ist sogar höher als bei Flutstrom.

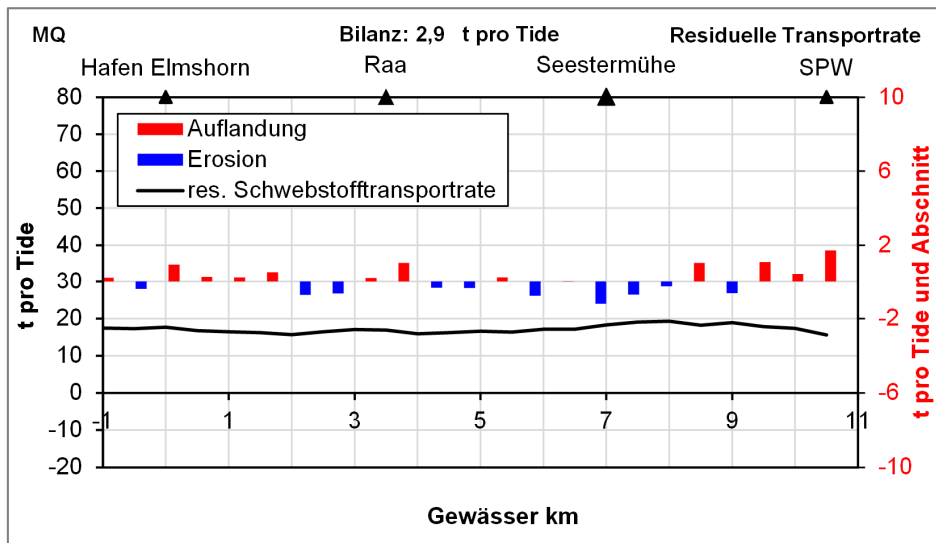


**Abbildung 96: Mittlere Schwebstoffkonzentration im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)**

In Abbildung 97 ist die residuelle Transportrate im Unterlauf der Krückau sowie deren Änderung innerhalb definierter Abschnitte von 500 m Länge ( $L = 500 \text{ m}$ ) dargestellt. Insgesamt werden unter den angenommenen Rahmenbedingungen (MQ, mittlere Tideverhältnisse) im Mittel rund  $2,9 \text{ t}$  Material pro Tide importiert. Dies entspricht einem Bruchteil des Materials, das in der Este abgelagert wird. Ein Vergleich der beiden Flüsse erfolgt am Ende dieses Abschnitts. In der Darstellung (Abbildung 97) ist zu erkennen, dass stromauf des Sperrwerks (km 10,5 – km 9,5) Material abgelagert wird. Zwischen

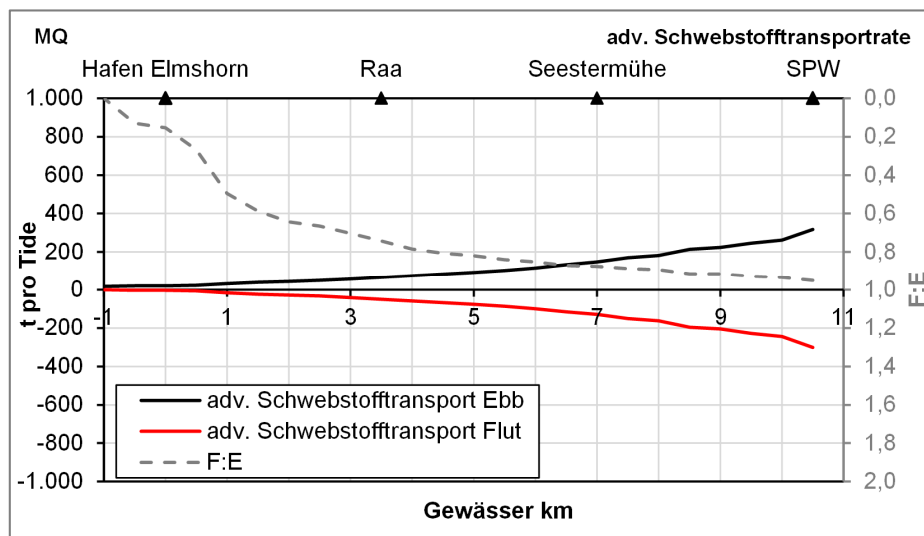
<sup>16</sup> Donner 2014 verwendet am unteren Modellrand synthetisch erzeugte Ganglinien

km 9,5 und km 2,0 kommen sowohl Abschnitte mit überwiegender Erosion als auch Abschnitte mit überwiegender Auflandung vor. Ein Erosionsschwerpunkt liegt zwischen km 8,0 und km 6,0. Der Bereich zwischen km 2,0 und km 0,0 ist ein Auflandungsschwerpunkt, in dem sich unter den zugrunde gelegten Rahmenbedingungen rund zwei Tonnen Material pro Tide ablagnern.



**Abbildung 97: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)**

Zur besseren Einordnung der abgelagerten Mengen werden wieder die Gesamtmengen betrachtet. Im sperrwerksnahen Bereich (km 10,5) werden rund zwei Tonnen Material pro Tide abgelagert (Abbildung 97). Die Gesamtmenge des transportierten Materials beträgt an dieser Stelle rund 620 t (300 t bei Flutstrom, 320 t bei Ebbstrom, Abbildung 98). Damit entsprechen die zwei Tonnen, die abgelagert werden, rund 0,3 Prozent der transportierten Gesamtmenge. Bei km 0,0 wird rund eine Tonne Material pro Tide abgelagert. Die Gesamtmenge des transportierten Materials beträgt 25 t (20 t mit dem Ebbstrom, 5 t mit dem Flutstrom). Damit entspricht die eine Tonne, die abgelagert wird, rund vier Prozent der transportierten Gesamtmenge. Daran wird deutlich, dass der Elmshorner Hafen eine sehr große Sedimentfalle ist.



**Abbildung 98: Advective Schwebstofftransportraten des Ebb- und des Flutstromes im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)**

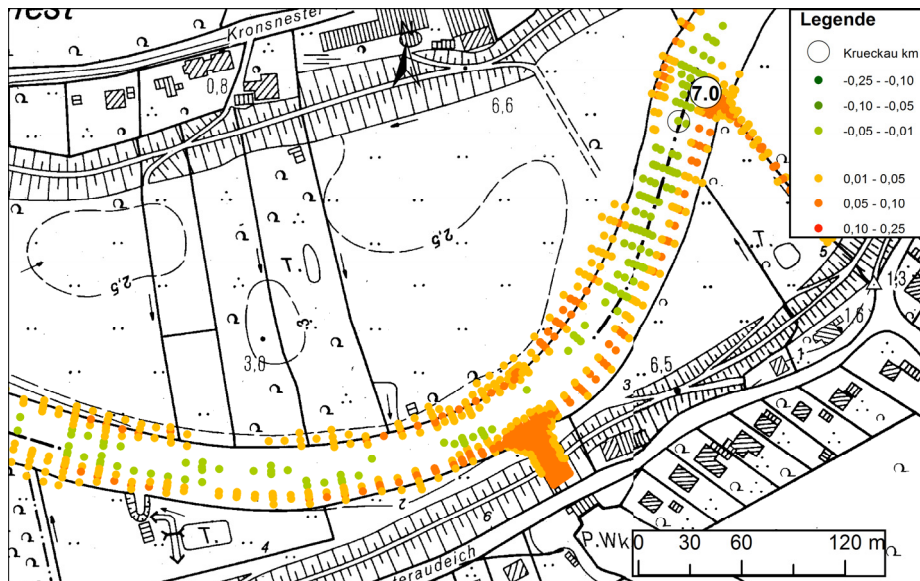
Im Folgenden werden einige charakteristische Abschnitte detaillierter betrachtet. Abbildung 99 zeigt die simulierten Sohländerungen im Bereich des Elmshorner Hafens. Im Zulaufbereich des Hafens tritt Erosion auf. Im Hafen selbst verlanden fast alle Bereiche. Eine Ausnahme bildet ein schmaler Streifen etwa in Gewässermitte, der weniger stark verlandet oder sogar tendenziell erodiert. In diesem Bereich befindet sich eine Rinne in der aufgrund der darin vorherrschenden höheren Strömungsgeschwindigkeiten keine oder nur eine geringfügige Verlandung stattfindet. Im Bereich um die Käpten-Jürs-Brücke<sup>17</sup>, die erst 2013 fertiggestellt wurde, tritt ausschließlich Verlandung auf.



**Abbildung 99: Simulierte Sohländerungen (in m) im Unterlauf der Krückau bei km 0,0 (Hafen Elmshorn) bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)**

Abbildung 100 zeigt die simulierten Sohländerungen bei km 7,0. Die zuvor dargestellte Bilanzierung (Abbildung 97) ergibt für diesen Abschnitt im Mittel eine Erosionstendenz. Die detaillierte Betrachtung zeigt, dass es im Bereich der Fahrrinne zur Erosion kommt, während die Böschungen und die seitlichen Becken und Gräben verlanden. Der Grund für die Erosionstendenz im Bereich der Fahrrinne ist auf die dort vorherrschenden höheren Fließgeschwindigkeiten zurückzuführen. Im Bereich der seitlichen Becken und Gräben sind die Fließgeschwindigkeiten insgesamt niedriger als im Bereich der Fahrrinne, weshalb es hier zu einer verstärkten Sedimentation kommt. Insgesamt wird in diesem Abschnitt aber mehr Material erodiert als deponiert.

<sup>17</sup> Verlängerung der Deichstraße über die Krückau



**Abbildung 100: Simulierte Sohländerungen (in m) im Unterlauf der Krückau bei km 7,0 (Seestermühe) bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)**

Die dargestellten Ergebnisse sind beispielhaft für den gesamten Unterlauf der Krückau. Hierfür lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen:

- i) Böschungen im gesamten Unterlauf verlanden. Dabei gibt es im Gewässerverlauf nur geringe Unterschiede in der Intensität der Verlandung.
- ii) Vorländer, die regelmäßig überflutet werden, verlanden
- iii) Aufweitungen (Abschnitt stromauf des Sperrwerks, seitliche Hafenecken, Siel-/Schöpfwerkszuläufe) verlanden stark
- iv) Gräben und Priele verlanden stark
- v) Fahrrinne ist meist stabil, Ausnahmen:
  - a. Mäßige Verlandung im Bereich des Sperrwerks
  - b. Starke Verlandung im Bereich des Elmshorner Hafens.

Nachdem die Ergebnisse für die einzelnen Flüsse zunächst separat dargestellt wurden, wird nun ein Vergleich der Flüsse untereinander vorgenommen. Dieser zeigt einige deutliche Unterschiede, die einerseits auf die unterschiedlichen Schwebstoffkonzentrationen, die über die Ränder eingesteuert werden, und andererseits auf die Eigenschaften der Flüsse sowie der Schwebstoffe zurückzuführen sind. Die wesentlichen Kenngrößen werden in Tabelle 21 einander gegenüber gestellt.

**Tabelle 21: Gegenüberstellung wesentlicher morphodynamischer Kenngrößen der Unterläufe von Este und Krückau bei mittleren Verhältnissen (MQ, mittlere Tideverhältnisse), ermittelt auf der Grundlage von Modellergebnissen**

<b>Kenngröße</b>	<b>Este</b>	<b>Krückau</b>
Mittelwert der einströmenden Schwebstoffkonzentration im Unterlauf	525 mg/l	270 mg/l
Mittelwert der ausströmenden Schwebstoffkonzentration im Unterlauf	410 mg/l	250 mg/l
Mittelwert der eingesteuerten Schwebstoffkonzentration im Oberlauf	30 mg/l	250 mg/l
Ort der maximalen Schwebstoffkonzentration	km 11,5 (von insges. 12,5 km)	km 7,0 (von insges. 10,5 km)
Ort der maximalen Bandbreite der Schwebstoffkonzentration	km 11,5 (von insges. 12,5 km)	km 6,0 (von insges. 10,5 km)
Advektive Schwebstofftransportrate bei Flut im Bereich der Mündung	~ 650 t	~ 300 t
Advektive Schwebstofftransportrate bei Ebbe im Bereich der Mündung	~ 615 t	~ 320 t
Verhältnis der Schwebstofftransportraten Ebbe/Flut	0,95 (Dämpfung)	1,07 (keine Dämpfung)
Abschnitt mit der größten Verlandungstendenz (absolut)	km 12,0 – km 12,5	km 12 – km 12,5
Abschnitt mit der größten Verlandungstendenz (relativ zur transportierten Menge)	km 12,0 – km 12,5 (Äußeres Sperrwerk)	km 0,0 – km 0,5 (Hafen Elmshorn)
Gesamtbilanz pro Tide	38,7 t pro Tide (Import)	2,9 t pro Tide (Import)

#### 4.4.1.3 Sensitivitätsstudien

Die dargestellten Analysen basieren auf Simulationsergebnissen hydrodynamisch-numerischer Modelle. Obwohl diese sorgfältig kalibriert und validiert wurden, sind die Ergebnisse möglicherweise mit Unsicherheiten behaftet (vgl. Abschnitt 2.4). Aus diesem Grund werden Sensitivitätsstudien durchgeführt, in denen Parameter und Randbedingungen variiert werden. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die eingesteuerte Schwebstoffkonzentration am unteren Modellrand, die Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe und der eingesteuerte Oberwasserzufluss einen besonders großen Einfluss auf die Modellergebnisse haben. Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudien sind im Folgenden dargestellt.

#### Variation der Schwebstoffkonzentration

Die tidegemittelten Verläufe der Schwebstoffkonzentrationen im Bereich der Mündungssperrwerke sind in Abbildung 101 und Abbildung 102 dargestellt. Neben den Mittelwerten sind jeweils ein erhöhter Konzentrationsverlauf (Mittelwert plus doppelte Standardabweichung) und ein reduzierter Konzentrationsverlauf (Mittelwert minus doppelte Standardabweichung) abgebildet.

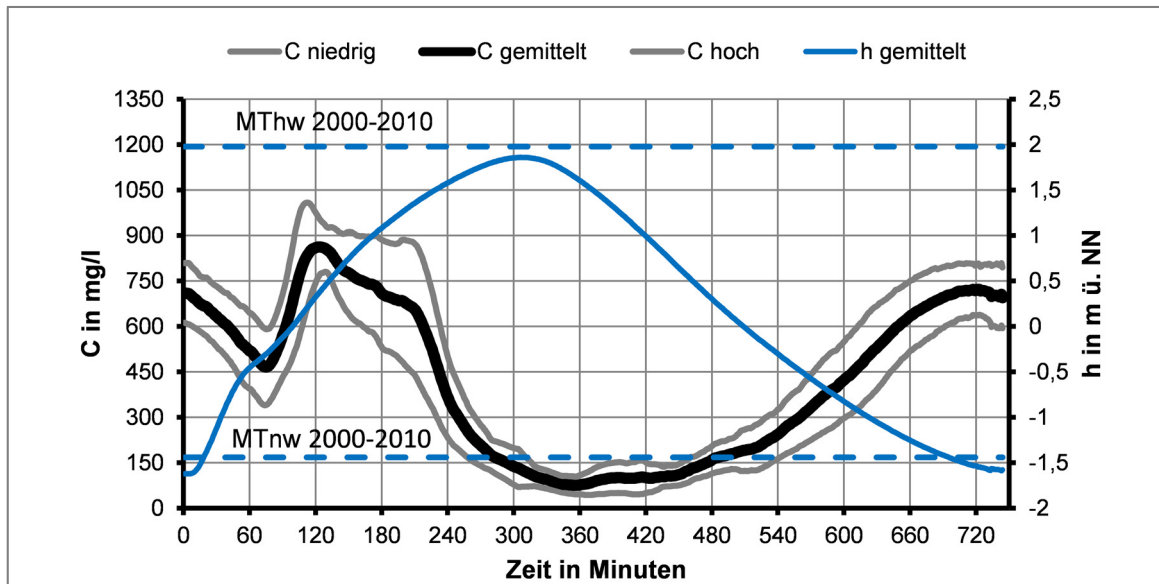


Abbildung 101: Ganglinie der gemittelten Schwebstoffkonzentration sowie Ganglinien der mittleren Schwebstoffkonzentration  $\pm$  der doppelten Standardabweichung im Mündungsbereich der Este

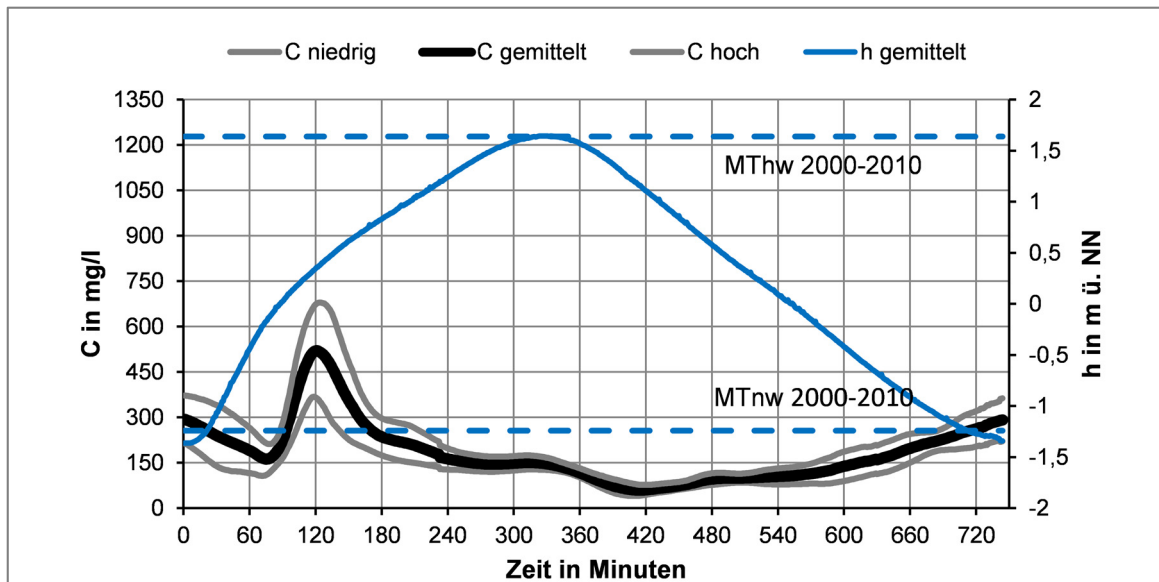


Abbildung 102: Ganglinie der gemittelten Schwebstoffkonzentration sowie Ganglinien der mittleren Schwebstoffkonzentration  $\pm$  der doppelten Standardabweichung im Mündungsbereich der Krückau

Die Auswirkungen der variierenden Schwebstoffkonzentration auf die residuelle Schwebstofftransportrate in der Este und der Krückau sind in Abbildung 103 und Abbildung 104 dargestellt. Die wesentlichen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- i) Die Schwebstoffkonzentration des Flutstromes beeinflusst die morphologische Entwicklung in den Nebenflüssen signifikant:
  - a. Eine erhöhte Schwebstoffkonzentration führt dazu, dass insgesamt mehr Material im Nebenfluss abgelagert wird.
  - b. Eine reduzierte Schwebstoffkonzentration führt dazu, dass insgesamt weniger Material im Nebenfluss abgelagert wird.
- ii) Die stärksten absoluten Änderungen treten in den unteren drei Gewässer-Kilometern auf (Este: km 12,5 – km 9,5, Krückau: km 10,5 – km 7,5). Im mittleren Abschnitt (Este: km 9,5 – km 5,5, Krückau km 7,5 – km 3,5) sind Änderungen noch spürbar. Im oberen Abschnitt treten praktisch keine Änderungen auf.
- iii) Abschnitte, die im Referenzszenario eine Verlandungstendenz aufweisen,
  - a. verlanden stärker bei einer erhöhten Schwebstoffkonzentration.
  - b. verlanden weniger stark bei einer reduzierten Schwebstoffkonzentration.
- iv) Abschnitte, die im Referenzszenario eine Erosionstendenz aufweisen, werden nur geringfügig beeinflusst. Die Erosionstendenz bleibt zumeist erhalten.

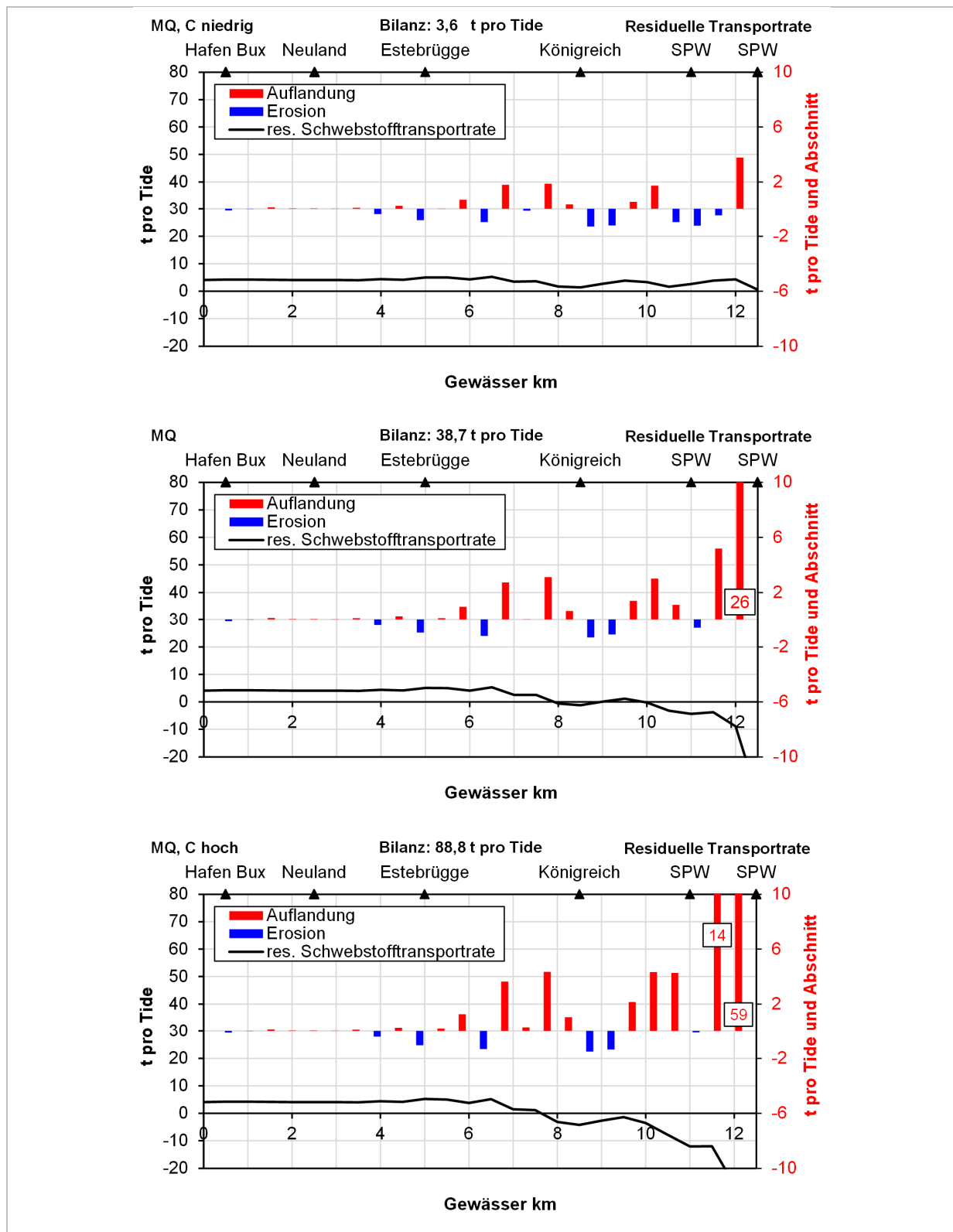


Abbildung 103: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este für bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation der am unteren Modellrand eingesteuerten Schwebstoffkonzentration (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)

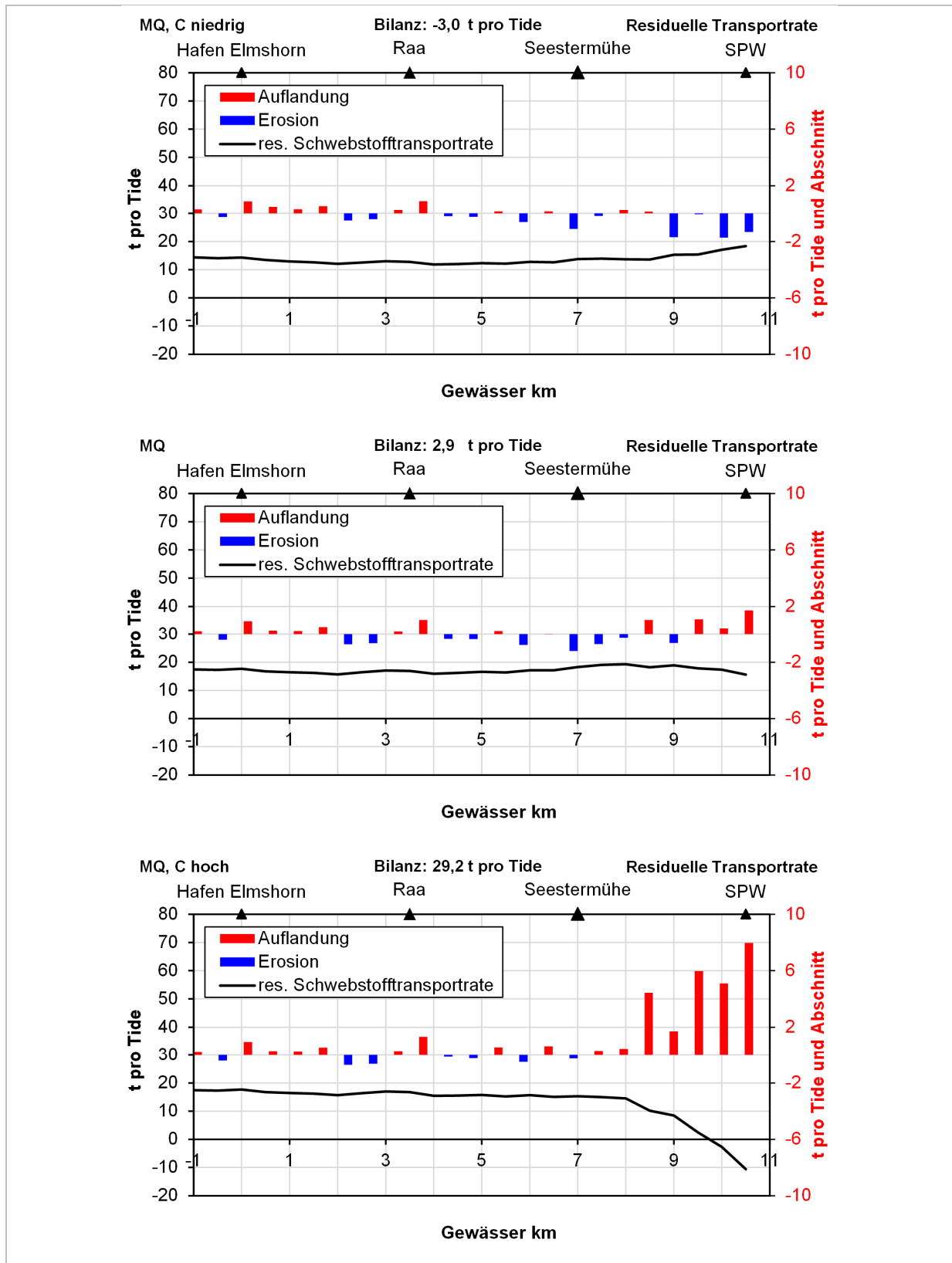


Abbildung 104: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau für bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation der am unteren Modellrand eingesteuerten Schwebstoffkonzentration (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)

### Variation der Sinkgeschwindigkeit

Das Sinkverhalten der kohäsiven Schwebstoffe in der Wassersäule (und damit auch der Schwebstofftransport) wird im Wesentlichen durch die Sinkgeschwindigkeit  $w_s$  beeinflusst. Diese wird von unterschiedlichen Prozessen beeinflusst (vgl. Abschnitt 3.3.3) und wird im Rahmen der Modellierung parametrisiert beschrieben. Im Rahmen der Sensitivitätsuntersuchungen wird untersucht welche Auswirkungen eine Verdopplung bzw. eine Halbierung der Sinkgeschwindigkeiten hat. Die Auswirkungen auf die residuelle Schwebstofftransportrate in der Este und der Krückau sind in Abbildung 105 und Abbildung 106 dargestellt. Die wesentlichen Erkenntnisse gelten für beide Flüsse und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- i) Eine erhöhte Sinkgeschwindigkeit führt dazu, dass insgesamt mehr Material im Nebenfluss abgelagert wird.
- ii) Eine reduzierte Sinkgeschwindigkeit führt dazu, dass insgesamt weniger Material im Nebenfluss abgelagert wird.
- iii) Die stärksten absoluten Änderungen treten in den unteren drei Fließkilometern auf. Im übrigen Bereich sind die absoluten Änderungen deutlich geringer.
- iv) Abschnitte, die im Referenzszenario eine Verlandungstendenz aufweisen,
  - a. verlanden stärker bei einer erhöhten Sinkgeschwindigkeit.
  - b. verlanden weniger stark bei einer reduzierten Sinkgeschwindigkeit. In einigen Abschnitten (vor allem in der Krückau) kehrt sich die Tendenz um.
- v) Abschnitte, die im Referenzszenario eine Erosionstendenz aufweisen,
  - a. erodieren stärker bei einer reduzierten Sinkgeschwindigkeit
  - b. erodieren weniger stark bei einer erhöhten Sinkgeschwindigkeit. Die Erosionstendenz bleibt in der Regel erhalten.

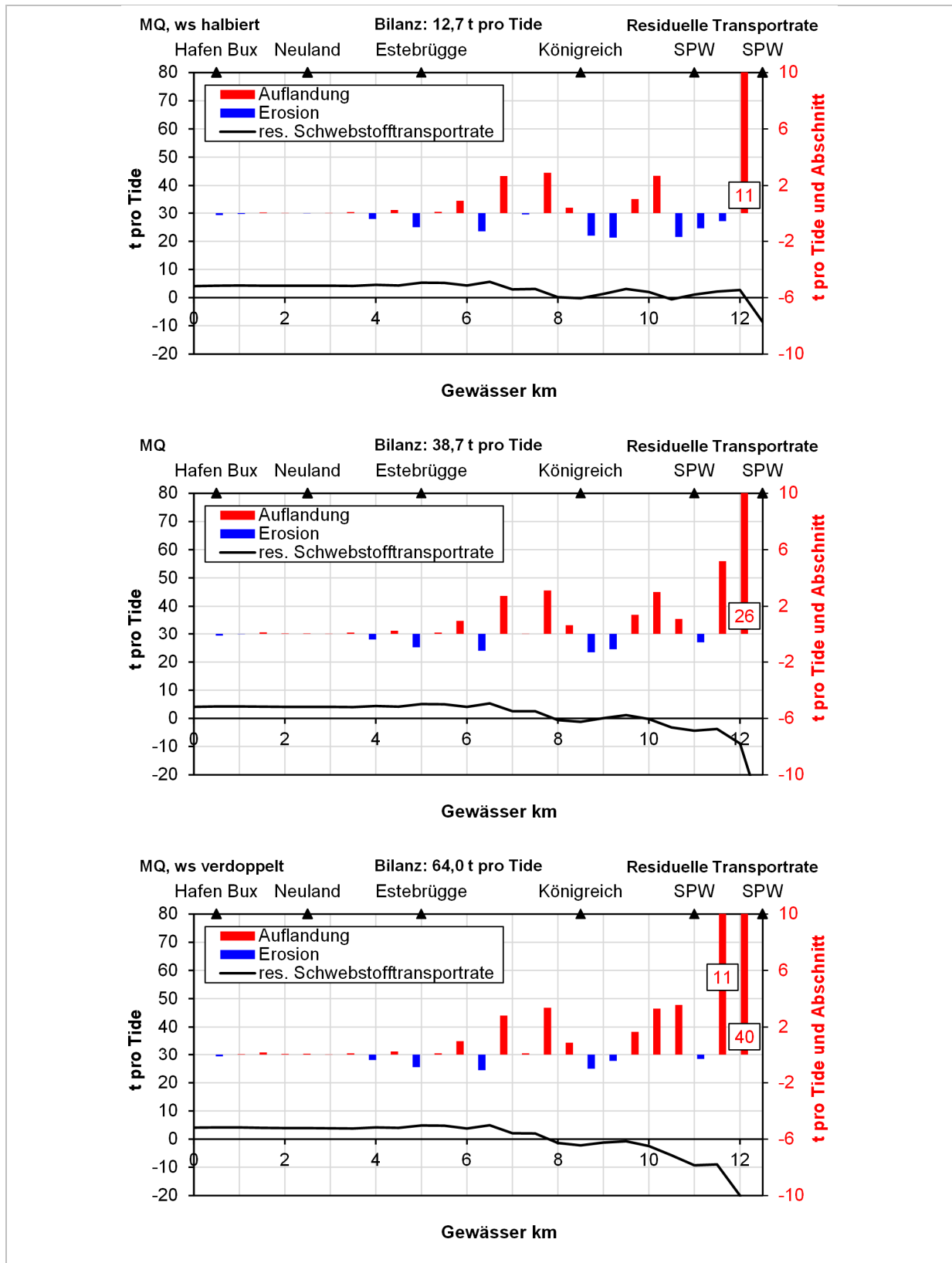


Abbildung 105: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este für bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation der Sinkgeschwindigkeiten (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)

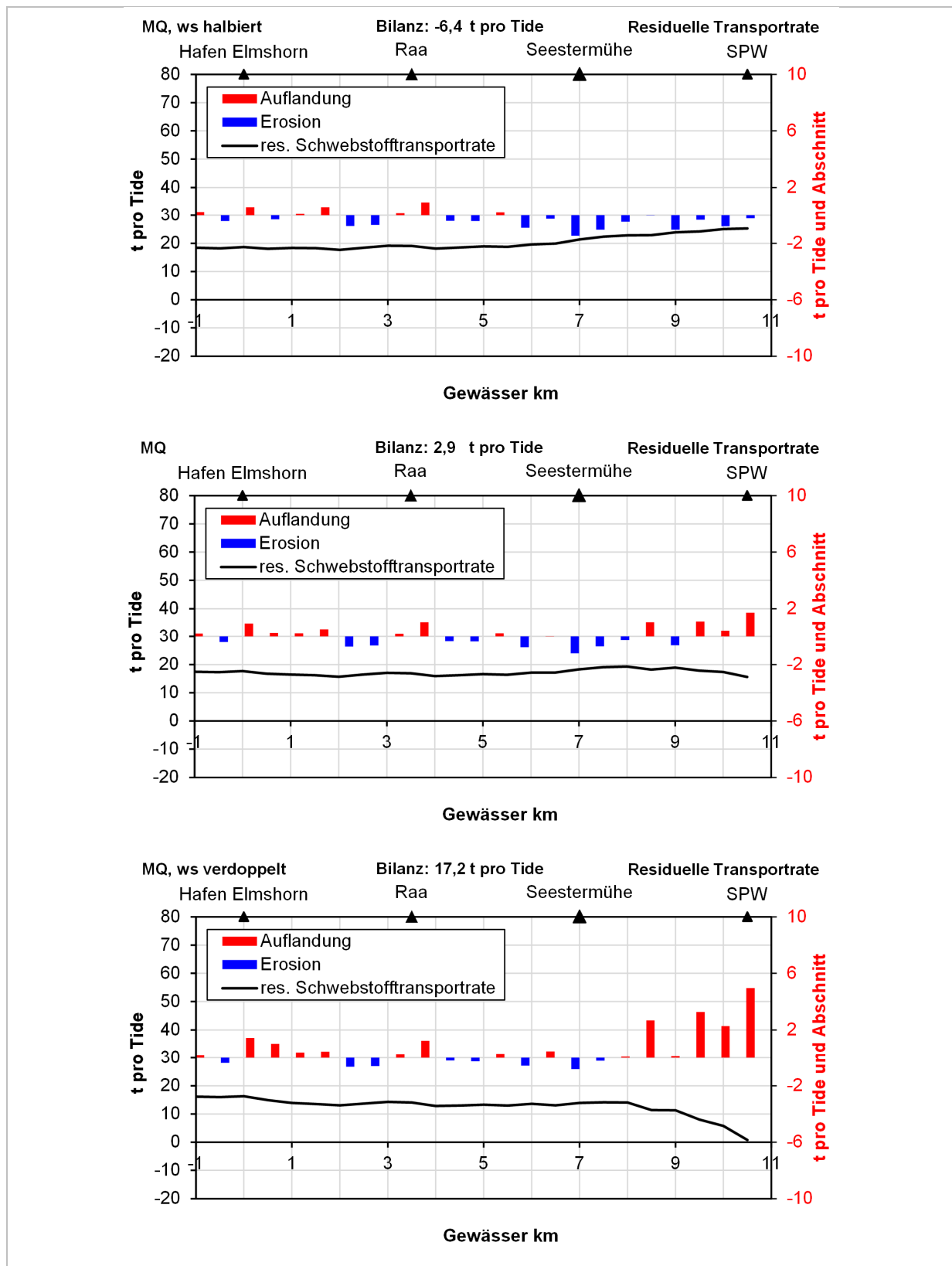


Abbildung 106: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau für bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation der Sinkgeschwindigkeiten (25.06.2014 – 10.07.2014)

### Variation des Oberwasserzuflusses

Der Schwebstofftransport wird durch den Oberwasserzufluss beeinflusst. Einerseits gelangen auf diese Weise Schwebstoffe in den Unterlauf. Andererseits hat der Abfluss einen signifikanten Einfluss auf das Strömungsgeschehen und damit auf das Erosions- und Depositionsverhalten. Die Auswirkungen eines erhöhten Abflusses auf die residuelle Schwebstofftransportrate in der Este und der Krückau sind in Abbildung 107 und Abbildung 108 dargestellt. Die wesentlichen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- i) In beiden Flüssen führt ein erhöhter Oberwasserzufluss (MHQ) dazu, dass insgesamt weniger Material abgelagert wird. Insgesamt werden die Unterläufe vom Sediment-Importeur zum Sedimentexporteur.
- ii) In der Este führt ein erhöhter Oberwasserzufluss (MHQ) dazu, dass in allen Abschnitten mit Ausnahme der beiden Abschnitte zwischen den Sperrwerken (km 12,5 – km 11,5) die Erosion dominiert. Die beiden Abschnitte zwischen den Sperrwerken verlanden hingegen stärker als bei MQ.
- iii) In der Krückau führt ein erhöhter Oberwasserzufluss dazu, dass einige Abschnitte stark erodieren (u.a. km 0,5 – km 3,5) und andere Abschnitte stark verlanden.
- iv) In beiden Flüssen nimmt die Verlandungstendenz in den Abschnitten in unmittelbarer Sperrwerksnähe bei hohem Oberwasserzufluss zu.

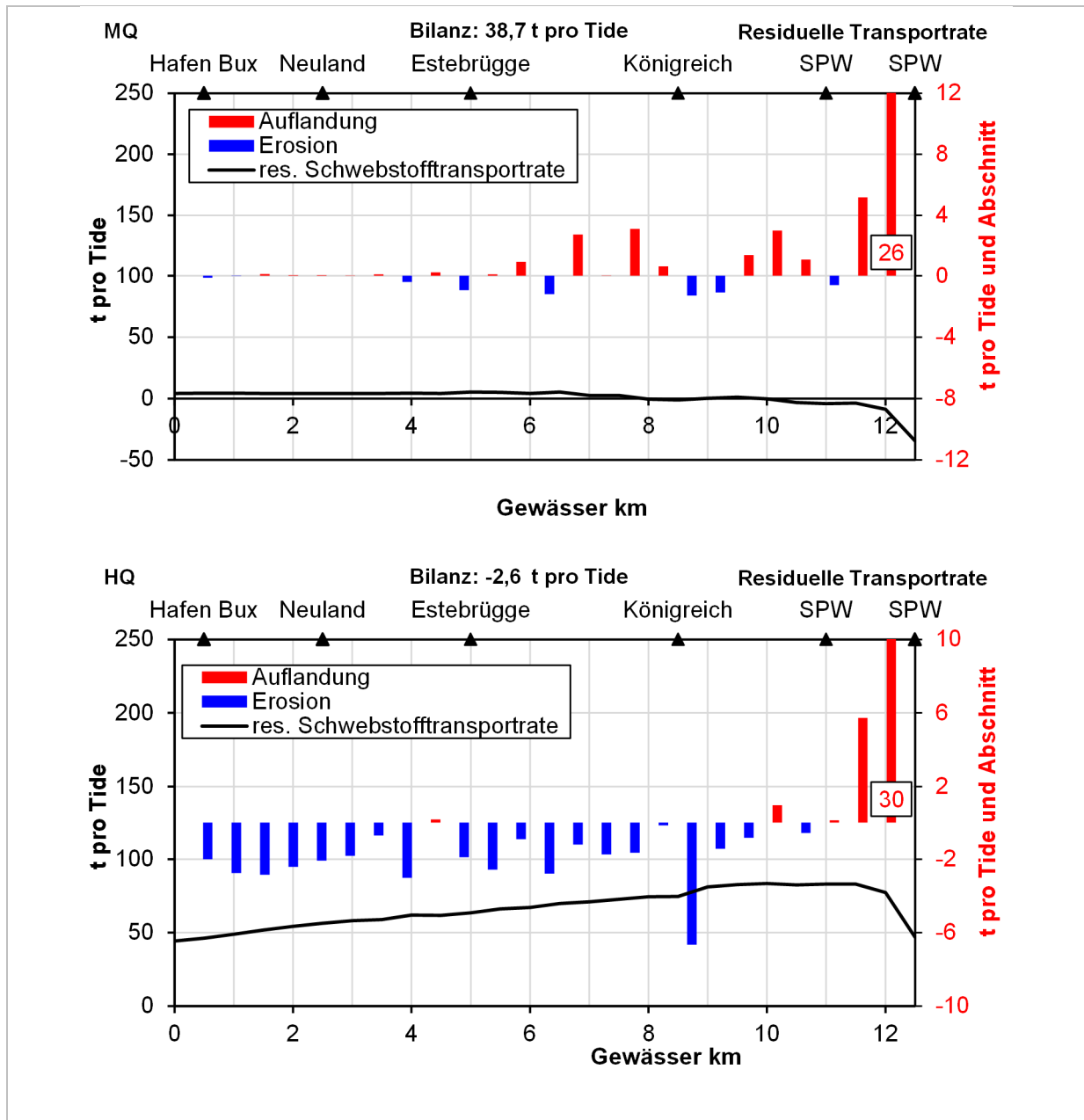


Abbildung 107: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este für bei mittleren Tideverhältnissen unter Variation des Oberwasserzuflusses (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014)

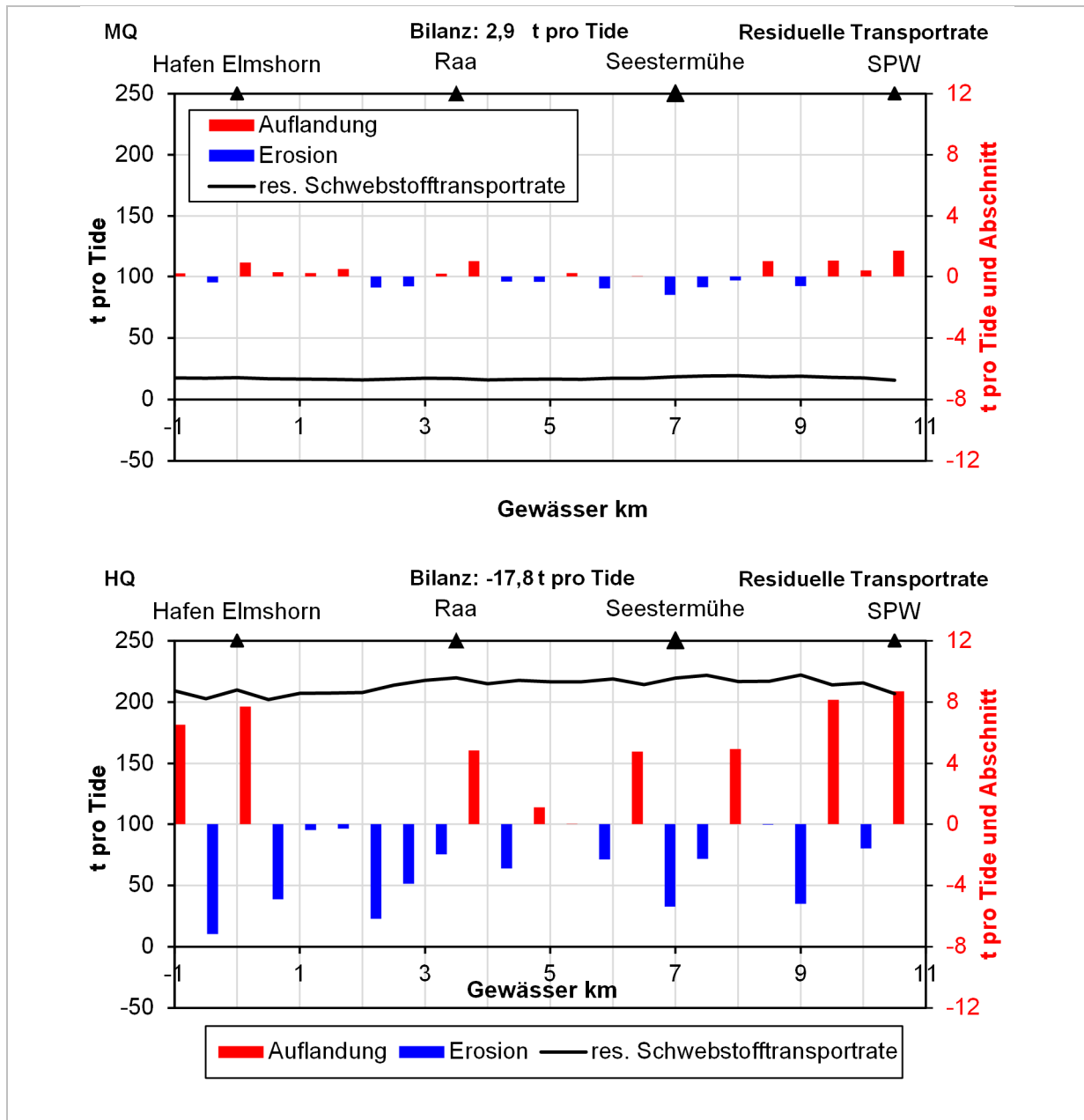


Abbildung 108: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau für bei mittleren Tideverhältnissen unter Variation des Oberwasserzuflusses (MQ und HQ) (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014)

#### 4.4.2 Morphologische Entwicklung

Ein Ansatz zur Untersuchung der morphologischen Entwicklung der Nebenflüsse der Tideelbe stammt aus den Beweissicherungsuntersuchungen zur Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt (WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority 2012a).

Ziel der Untersuchungen war die Erfassung möglicher ausbaubedingter Querschnittsveränderungen in den Nebenflüssen. Hierzu wurden Querprofile regelmäßig vermessen. Auswertung und Analyse erfolgten im Querschnitt und im Längsschnitt. Dabei wurden die erhobenen Datensätze mit einem Referenzzustand vor Beginn des Ausbaus im Jahr 1999 verglichen.

Im Ergebnis konnte für keinen Nebenfluss ein signifikanter Trend und für wenige Abschnitte einzelner Nebenflüsse eine Tendenz identifiziert werden. Eine wesentliche Erschwernis bei der Auswertung war die unzureichende Datengrundlage, die zuverlässige Analysen verhinderte. Die mäßige Qualität der Datengrundlage ist auf inkonsistente Messbereiche (u.a. Messbereich nicht von Böschungsoberkante bis Böschungsoberkante), mangelhafte Datendichte (nur wenige Querprofilmessungen für den Referenzzustand) und die Beeinflussung durch Unterhaltungsmaßnahmen zurückzuführen, die eine zuverlässige Analyse sehr schwierig machen. Die wesentlichen Erkenntnisse zu den Trends in der Sohlentwicklung sind spezifisch für jeden Nebenfluss in Tabelle 22 zusammengestellt.

**Tabelle 22: Trends in der Sohlentwicklung an ausgewählten Nebenflüssen der Tideelbe gegenüber dem Referenzzustand von Beginn der Ausbaumaßnahmen in der Unter- und Außenelbe in 1999/2000. aus (WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority 2012a, 2012b)<sup>18</sup>**

Fluss	Querprofile seit	Längsschnitt	Querschnitt	Bemerkungen
Oste	1999	kein	kein	
Schwinge	1997	Nicht möglich	Nicht möglich	Messdaten häufig nur im Bereich der Fahrrinne; Baggerungen ab 2005 alle 2 Jahre vom Stader Hafen bis zur Mündung, im Sperrwerks- und Mündungsbereich häufiger
Lühe	1997	kein	kein	Nahezu jährliche Baggerungen im Sperrwerks- und Mündungsbereich
Este	1997	kein	Leichte Abnahme der Querschnittsflächen	Regelmäßige Baggerungen im Sperrwerks- und Mündungsbereich
Ilmenau	1994	Nicht möglich	Nicht möglich	Kein Referenzzustand unmittelbar vor der Baumaßnahme
Stör	1997	Nicht möglich	Nicht möglich	Referenzzustand nur für zwei Profile vorhanden; regelmäßige Baggerungen Wendestelle Itzehoe, Liegestellen, Sperrwerk und Mündung durch WSA und Land
Krückkau	1995	kein	kein	Regelmäßige Baggerungen im Sperrwerks- und Mündungsbereich
Pinnau	1997	kein	kein	Regelmäßige Baggerungen im Sperrwerks- und Mündungsbereich, sowie im Hafenebereich Uetersen

<sup>18</sup> Die Nebenflüsse auf schleswig-holsteinischer Seite werden im Abschlussbericht nicht beschrieben.

Aufbauend auf den Ergebnissen und den Erkenntnissen hinsichtlich der Anforderungen an die Messdaten (konsistente Messbereiche, ausreichende Datendichte, geringe Beeinflussung durch Unterhaltungsmaßnahmen) wurde im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes Messprogramm konzipiert.

Die Grundlagen des Messprogramms wie Messtechnik, Messverfahren, Auswertemethodik und durchgeführte Messkampagnen wurden bereits in Abschnitt 2.2.2 erläutert. Hinsichtlich der Beeinflussung durch Unterhaltungsmaßnahmen sind die Unterläufe der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Fokusgewässer Este und Krückau gut geeignet für eine langfristige Untersuchung, da lediglich im Bereich der Mündungssperrwerke Unterhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse für die Krückau dargestellt. Für die Krückau liegt eine längere Messzeitreihe (2006 – 2015) als für die Este (2009 - 2015) vor. Vor dem Hintergrund der langfristigen morphologischen Zeitskalen (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) ist davon auszugehen, dass die Erkenntnisse, die aus der Analyse der längeren Zeitreihe gewonnen werden, aussagekräftiger sind. Diese werden im Folgenden dargestellt, analysiert und bewertet.

#### **4.4.2.1 Entwicklung im Längsschnitt**

Die Sohlhöhen entlang des Talweges des Unterlaufs der Krückau für die Jahre 2006 – 2015 sind in Abbildung 109 dargestellt. Anhand der farblichen Abstufung ist die zeitliche Entwicklung zu erkennen (Hellblau: 2006 – Dunkelblau: 2014). Die aktuellste Topographie ist in Orange dargestellt. Der Mittelwert aus allen Jahren ist in Schwarz dargestellt. Die Standardabweichung ist in Rot dargestellt und an der sekundären Achse aufgetragen.

Am Verlauf der mittleren Sohlhöhe (schwarze Linie) werden die Charakteristiken des Unterlaufs der Krückau deutlich. Tendenziell nimmt die mittlere Sohlhöhe entlang des Talweges zwischen dem Elmshorner Hafen (km 0) und dem Sperrwerk (km 10,7) ab. Dabei ist der Verlauf von einem Rauschen, d.h. lokale Schwankungen nach oben oder unten, umgeben. Im oberen Abschnitt (km 0 – km 5) ist das Rauschen vergleichsweise gering. Ab km 5 nimmt es zunächst ein wenig und ab km 7 sehr stark zu. Das starke Rauschen in diesem Abschnitt ist auf die Abfolge mehrerer Flusskrümmungen zurückzuführen. Die Tiefpunkte befinden sich jeweils im Bereich der Prallhänge, während die Sohlhöhen im Bereich der Wendepunkte zwischen den Krümmungen deutlich flacher sind. Abbildung 110 verdeutlicht dies am Beispiel des Abschnittes zwischen km 8,8 und km 9,8, wo diese Charakteristik besonders stark ausgeprägt ist. Hier schwanken die Sohlhöhen sehr stark zwischen -2,0 m ü. NHN und -4,0 m ü. NHN. Der Tiefpunkt bei km 9,5 stellt zugleich den absoluten Tiefpunkt im Unterlauf der Krückau dar. In Richtung stromab steigt die Sohle wieder deutlich an auf -2,0 m ü. NHN und fällt dann unmittelbar vor dem Sperrwerk auf -3,5 m ü. NHN ab. Diese Höhe entspricht der des Dremfels im Bereich der Sperrwerkssohle. Das Sperrwerk bildet also ebenfalls einen lokalen Tiefpunkt. Im Gegensatz zu den anderen lokalen Tiefpunkten liegt das Sperrwerk allerdings nicht im Bereich einer Krümmung.

Aus der Betrachtung der zeitlichen Entwicklung gehen folgende Erkenntnisse hervor:

- i) Im Bereich des Elmshorner Hafens (km 0,0 – km 1,0) zeigt sich eine Verlandungstendenz. Zum einen liegen die dunkelblauen Graphen unterhalb der hellblauen Graphen. Zum anderen liegt die aktuellste Topographie aus dem Jahr 2015 (orange Line) oberhalb des Mittelwertes (schwarze Linie).
- ii) Im mittleren Abschnitt (km 2,0 – km 6,0) zeigt sich keine eindeutige Tendenz. Die aktuellste Topographie aus dem Jahr 2015 (orange Line) liegt unterhalb des Mittelwertes (schwarze Linie). Eine mögliche Erklärung hierfür ist das Hochwasser im Dezember 2014, das in diesem Bereich zur Erosion geführt hat. Wie die Sensitivitätsstudien (Abschnitt 4.4.1.3) gezeigt haben, führt ein hoher Binnenabfluss genau in diesem Bereich zu einer deutlichen Erosion.
- iii) Im unteren Abschnitt (km 6,0 – km 10,5) zeigt sich ebenfalls keine eindeutige Tendenz. Die aktuellste Topographie aus dem Jahr 2015 (orange Line) liegt im Bereich des Mittelwertes (schwarze Linie).

Die rote Linie stellt die Standardabweichung um den Mittelwert dar. Im oberen Abschnitt (km 0,0 – km 5,5) ist die Standardabweichung etwas höher als im unteren Abschnitt (km 5,5 – km 10,5). Das bedeutet, dass die Schwankungen der Sohlhöhe innerhalb der Messreihe im oberen Abschnitt etwas höher sind als im unteren Bereich.

Insgesamt ist im Verlauf der Standardabweichung ein deutliches Rauschen zu erkennen. Dieses Rauschen ist bereits gedämpft durch die Darstellung als gleitendes Mittel mit einer Fensterbreite von 100 m. Es fällt auf, dass die Standardabweichung vor allem im Bereich der lokalen Tiefpunkte (Prallhänge der Flusskrümmungen) geringer ist als in den übrigen Abschnitten, d.h. dass die Sohlhöhen hier stabiler sind.

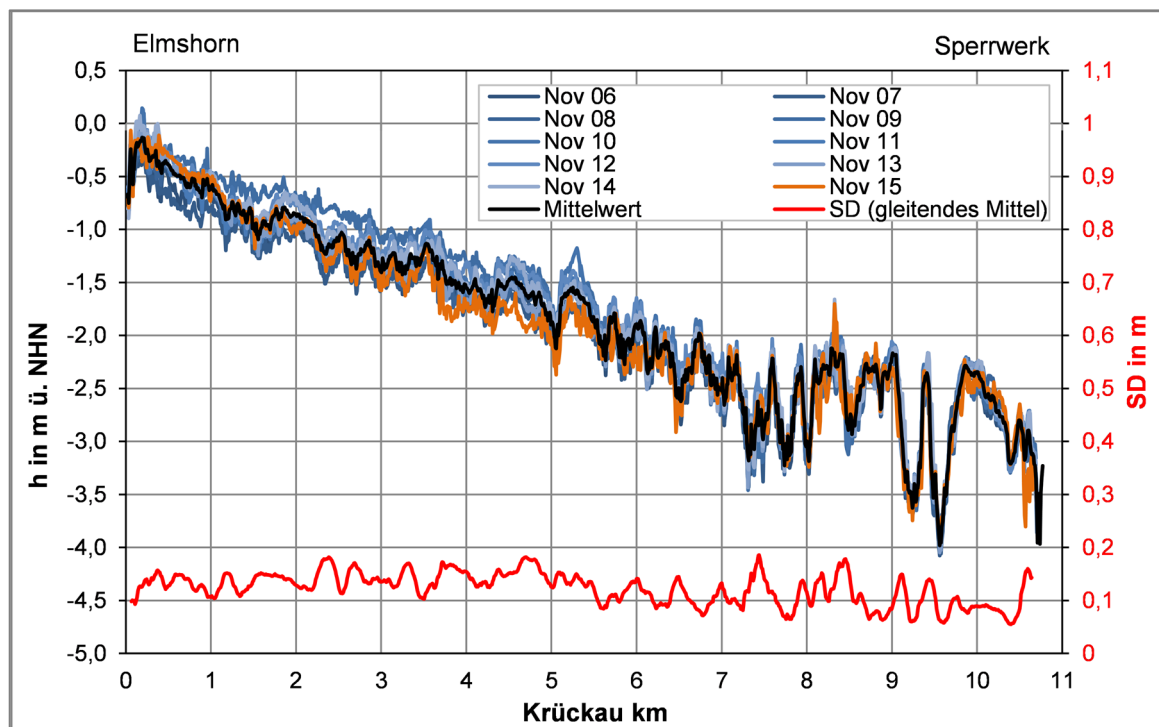


Abbildung 109: Längsschnitte der Sohlhöhen des Talweges im Unterlauf der Krückau

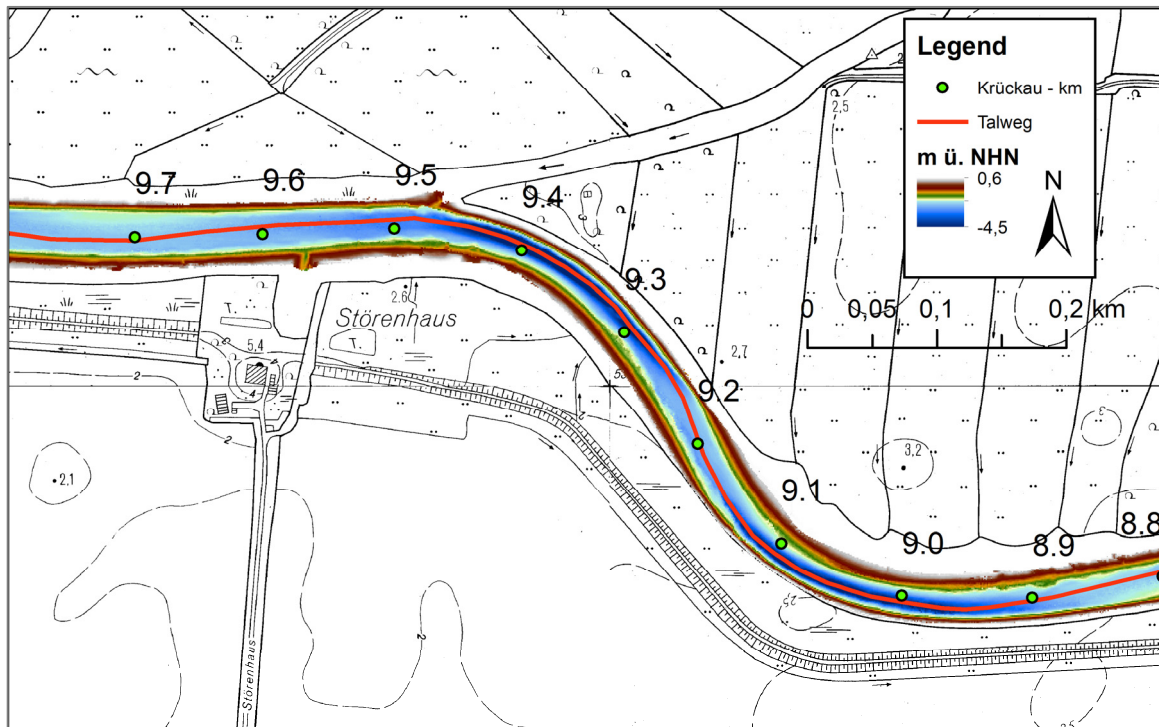


Abbildung 110: Unterwassertopographie im Unterlauf der Krückau (km 8,8 – km 9,8) bei Störenhaus im Nov 2015

#### 4.4.2.2 Entwicklung im Querschnitt

Die Sohlhöhen an ausgewählten Profilen im Unterlauf der Krückau für die Jahre 2006 – 2015 sind in Abbildung 111 bis Abbildung 113 dargestellt. Anhand der farblichen Abstufung ist die zeitliche Entwicklung zu erkennen (Hellblau: 2006 – Dunkelblau: 2014). Die aktuellste Topographie ist in Orange dargestellt. Der Mittelwert aus allen Jahren ist in Schwarz dargestellt. Die Standardabweichung in Rot dargestellt und an der sekundären Achse aufgetragen.

Aus der Betrachtung der zeitlichen Entwicklung gehen folgende Erkenntnisse hervor:

- i) die Topographie im Bereich des Talweges
  - a. verändert sich nur geringfügig,
  - b. zeigt eine leichte Erosionstendenz, wenn es zu Veränderungen kommt (Ausnahme: Verlandungstendenz im Elmshorner Hafen, vgl., Abschnitt 4.4.2.1)
- ii) die Topographie im Bereich der Böschungen
  - a. verändert sich nur geringfügig,
  - b. zeigt eine leichte Verlandungstendenz, wenn es zu Veränderungen kommt (Ausnahme: Verlandungstendenz im Elmshorner Hafen, vgl. Abschnitt 4.4.2.1)

Insgesamt ist in den vorliegenden Messdaten kein signifikanter Trend auszumachen. Die rote Linie stellt die Standardabweichung um den Mittelwert dar. In allen drei Profilen ist die Standardabweichung vergleichsweise klein (0,05 – 0,15 m), was darauf hindeutet, dass die Sohlhöhen stabil sind. Innerhalb des Querprofils ist die Standardabweichung im Bereich des Talweges kleiner (und damit stabiler) als im Bereich der Böschungen.

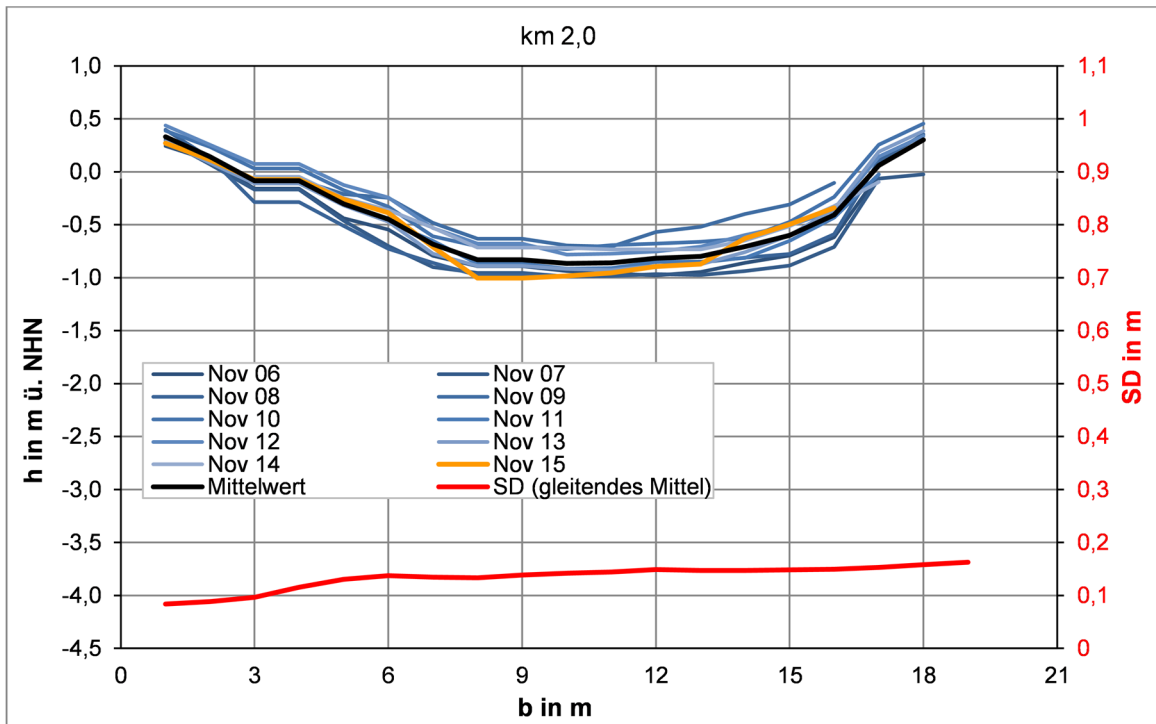


Abbildung 111: Sohltopographie der Krückau bei km 2,0 zwischen 2006 und 2015

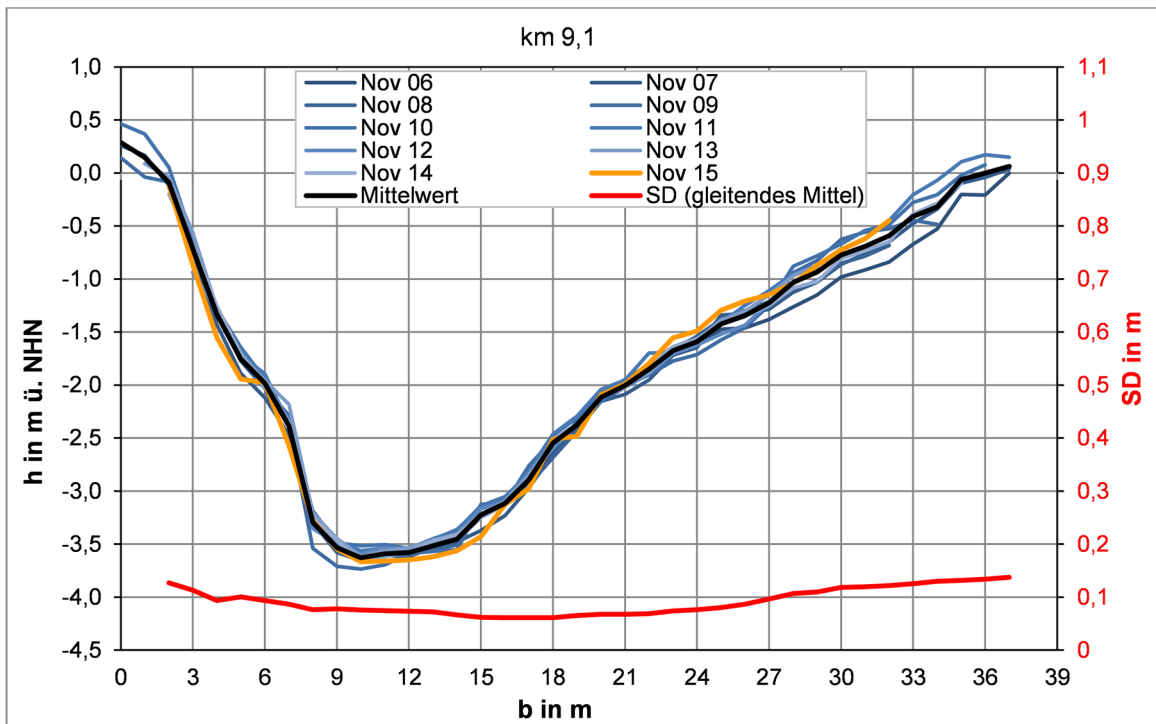


Abbildung 112: Sohltopographie der Krückau bei km 9,1 zwischen 2006 und 2015

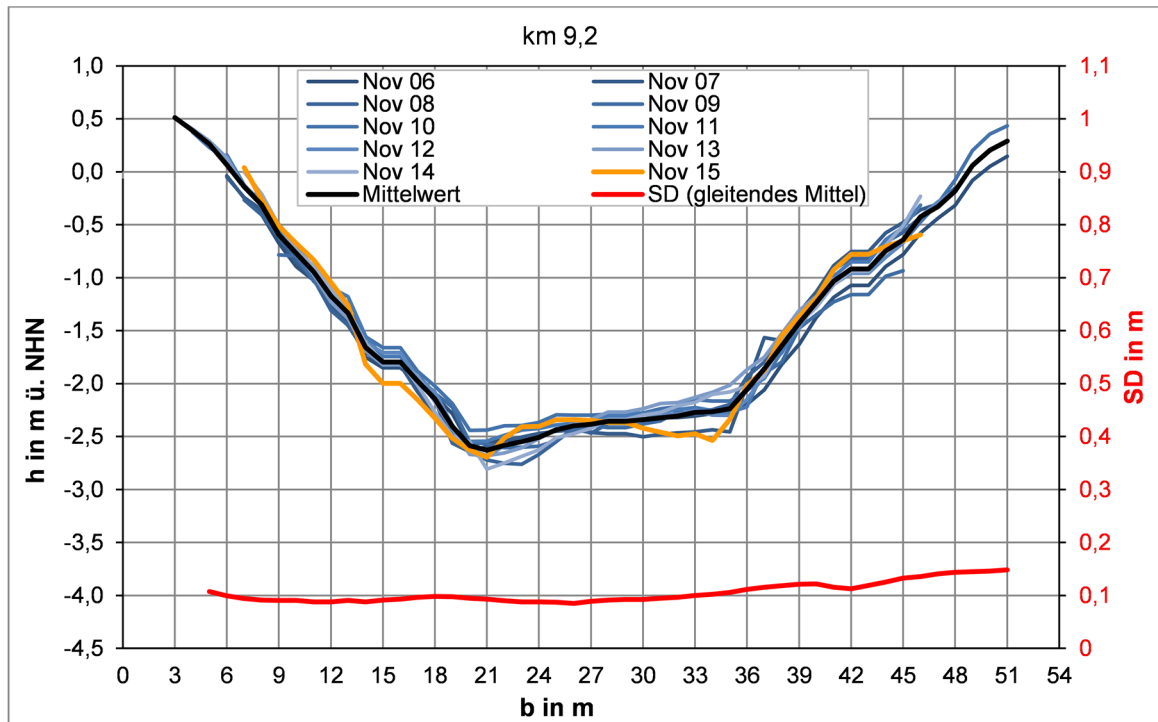


Abbildung 113: Sohltopographie der Krückau bei km 9,2 zwischen 2006 und 2015

Entwicklung insgesamt

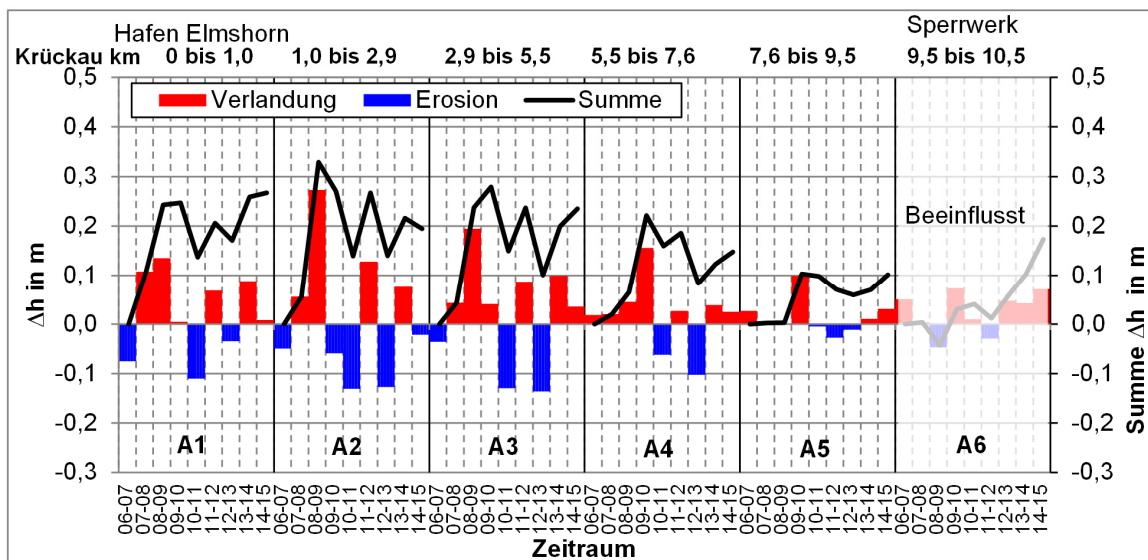


Abbildung 114 Die abschnittsweise gemittelten Sohlhöhenänderungen im Unterlauf der Krückau sind in Abbildung 114 dargestellt (rote Säule: Verlandung, blaue Säule: Erosion). Dazu wurde der Unterlauf in insgesamt sechs Abschnitte unterteilt, die jeweils eine ähnliche Charakteristik aufweisen. Die mittleren vier Abschnitte haben jeweils eine Länge von etwa zwei Kilometern. Die beiden äußeren Abschnitte (Elmshorner Hafen, Sperrwerksnahbereich) sind in etwa einen Kilometer lang.

Der oberste Abschnitt A1 (km 0 – km 1,0) umfasst den Elmshorner Hafen. In diesem Bereich ist das Gewässerprofil der Krückau vergleichsweise breit. Der unterste Abschnitt A6 stellt den Nahbereich des Sperrwerks dar. In diesem Bereich ist das Gewässerprofil der Krückau ebenfalls vergleichsweise breit. Außerdem werden in diesem Abschnitt Unterhaltungsmaßnahmen durchgeführt (Spülungen etc.), so dass die Daten aus diesem Abschnitt A6 beeinflusst sind und somit keine zuverlässige Interpretation

möglich ist. Aus Gründen der Vollständigkeit werden die Ergebnisse trotzdem dargestellt, jedoch nicht weiter interpretiert.

In allen Abschnitten kommen sowohl Jahre mit Verlandung als auch Jahre mit Erosion vor. Die größten Änderungsraten (-0,12 – 0,26 m) treten in Abschnitt A2 auf, gefolgt von den Abschnitten A1 und A3. Daraus ist zu schließen, dass diese Abschnitte morphologisch besonders aktiv sind. Zwischen A2 und A5 nimmt die Intensität kontinuierlich ab. In A5 ist die morphologische Aktivität am geringsten.

Innerhalb eines Zeitraumes können in den Abschnitten unterschiedliche Tendenzen auftreten (2006 – 2007, 2009 – 2010, 2011 – 2012, 2014 - 2015). Größtenteils weisen die Abschnitte jedoch einheitliche Trends auf (Erosion: 2010 – 2011 und 2012 – 2013 sowie Verlandung: 2007 – 2008, 2008 – 2009, 2013 - 2014)

Werden die jährlichen Änderungen aufsummiert, erhält man den Verlauf der mittleren Sohlhöhenänderung (schwarze Linie in Abbildung 114). Daran wird deutlich, wie sich die Sohlhöhen zwischen 2006 und 2015 in den einzelnen Abschnitten verändert haben.

Insgesamt sind die Sohlhöhen seit 2006 im Mittel angestiegen. In den Abschnitten A1 bis A3 ist der Anstieg am deutlichsten (rd. 0,2 - 0,3 m), gefolgt von Abschnitt A4 (rd. 0,15 m) und Abschnitt A5 (rd. 0,1 m). Der Verlauf zeigt jedoch, dass das heutige höhere Sohlniveau auf hohe Auflandungsraten in den Jahren 2007 – 2009 (bzw. 2007 – 2010) zurückzuführen ist. Betrachtet man nur die Jahre danach, dann ist entweder keine Tendenz (A1, A5) oder sogar eine leicht negative Tendenz (A2, A3, A4) erkennbar.

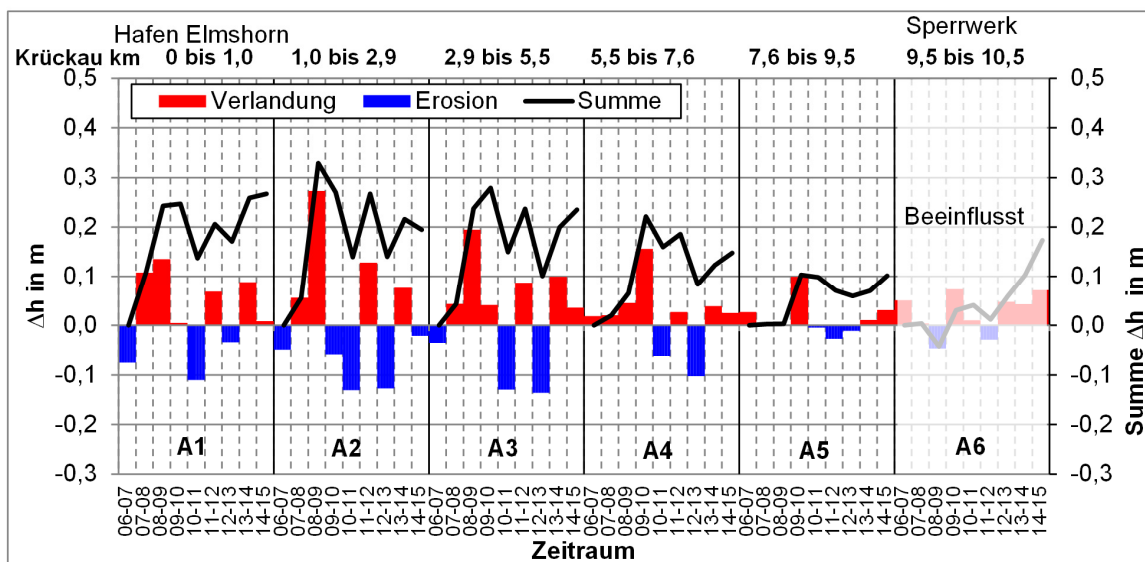


Abbildung 114: Abschnittsweise gemittelte Sohlhöhenänderungen im Unterlauf der Krückau im Messzeitraum Nov 2006 – Nov 2015

#### 4.4.2.3 Einflussfaktoren auf die Sohlentwicklung

Aus den Modelluntersuchungen ist bekannt, dass die Schwebstoffkonzentration in der Elbe die Entwicklung der Sohltopographie im Unterlauf der Krückau beeinflusst. Eine höhere

Schwebstoffkonzentration führt zu stärkerer Verlandung. Eine niedrigere Schwebstoffkonzentration führt zu einer Reduktion der Verlandung oder sogar zur Erosion.

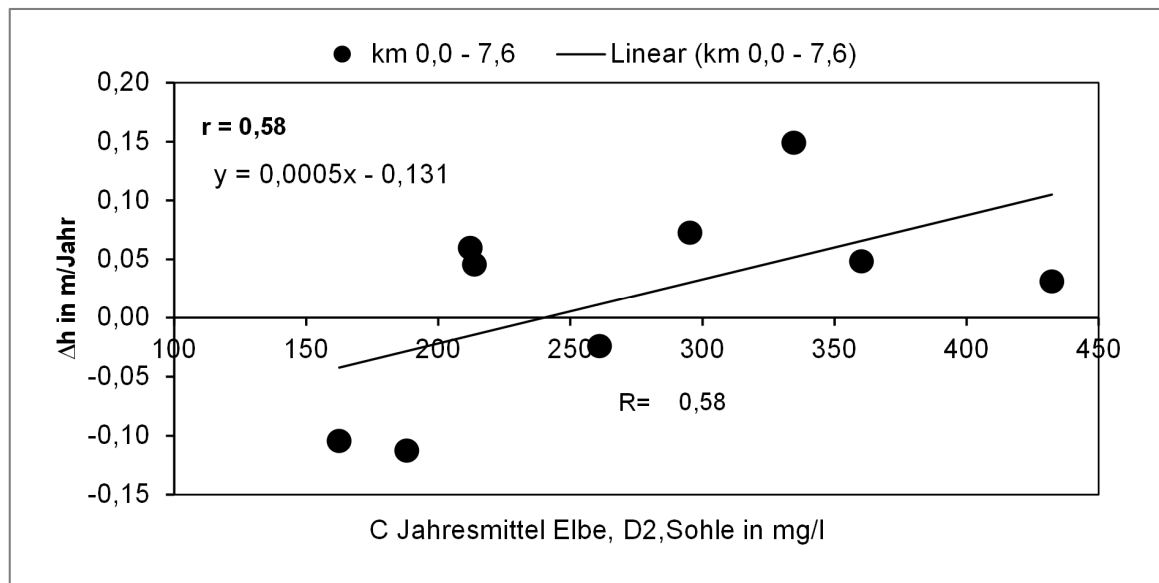
In Abbildung 115 ist neben den abschnittsweise gemittelten Sohlhöhenänderungen im Unterlauf der Krückau (rote Säule: Verlandung, blaue Säule: Erosion) die mittlere Schwebstoffkonzentration in der Elbe dargestellt (braune Linie). Die Grundlage für die dargestellten Werte bilden die Trübungsmessungen der Dauermessstation D2. Diese ist etwas weiter von der Krückau-Mündung entfernt als die Dauermessstation D3, allerdings sind die Lücken in den Datenreihen von D2 deutlich kleiner als in den Datenreihen von D3. Daher werden die Daten von D3 herangezogen.

Bis 2011 war die Dauermessstation D3 mit einem RCM9 Trübungsmesser des Herstellers Aanderaa ausgestattet. Anschließend erfolgte die Ausrüstung der Station mit der Messplattform Seaguard (ebenfalls Aanderaa) (BFG 2014). Als Faktor zur Umrechnung des Trübungswertes in eine Schwebstoffkonzentration wurde der Wert 1,5 für RCM9 und der Wert 3,0 für Seaguard verwendet.

Die Verläufe der Sohländerungsraten einiger Abschnitte weisen ein ähnliches Verhaltensmuster auf wie die der mittleren Schwebstoffkonzentration (Abbildung 115). Eine höhere Schwebstoffkonzentration geht einher mit einer stärkeren Verlandung. Dies gilt vor allem für die Abschnitte A1 bis A4, die insgesamt eine vergleichsweise hohe morphologische Aktivität aufweisen. Für Abschnitt A5 gilt diese Erkenntnis nicht. Allerdings ist hier die morphologische Aktivität insgesamt sehr gering, d.h. die Sohlhöhen sind in diesem Abschnitt sehr stabil. Die Korrelationskoeffizienten liegen im Bereich zwischen 0,3 und 0,64. Zwischen 0,3 und 0,5 spricht man im Allgemeinen von einer schwachen und zwischen 0,5 und 0,7 von einer mittleren Korrelation. Insgesamt ergibt sich für die Abschnitte A1 bis A4 ein Korrelationskoeffizient von 0,58, d.h. eine mittlere Korrelation. Werden die Daten im Streudiagramm aufgetragen (Abbildung 116), wird der mögliche Zusammenhang deutlich.



Abbildung 115: Abschnittsweise gemittelte Sohlhöhenänderungen im Unterlauf der Krückau sowie die mittlere Schwebstoffkonzentration in der Elbe (Dauermessstation D2, Sohle, Daten: WSV)



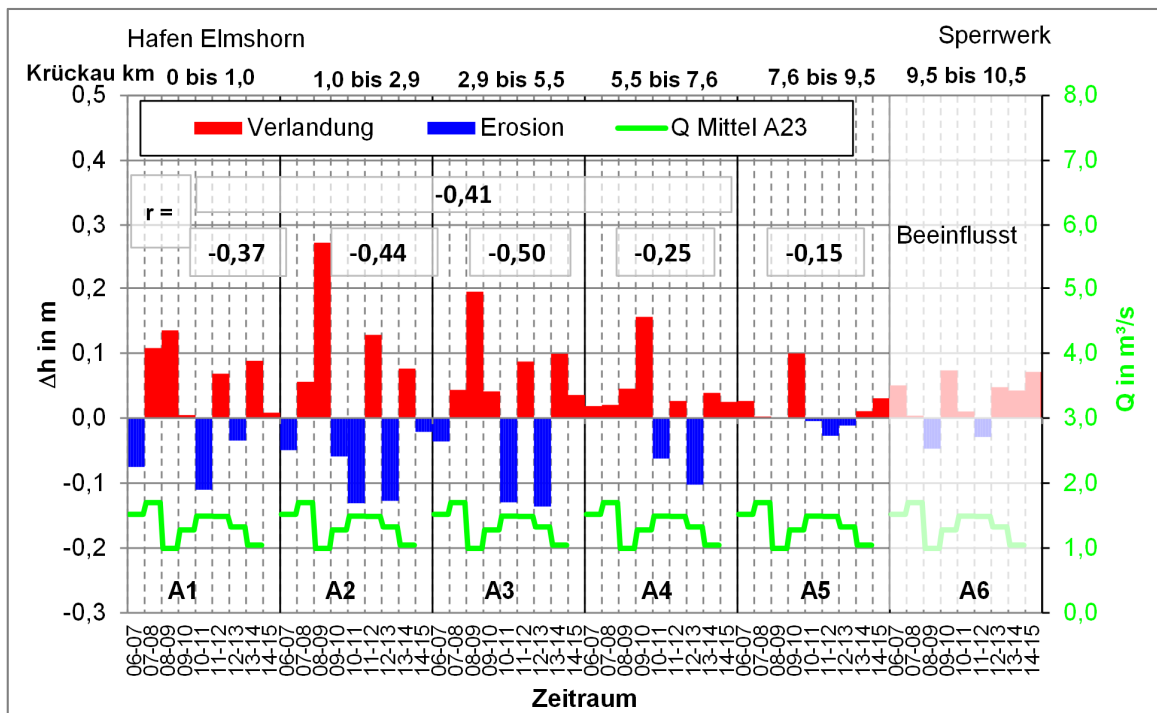
**Abbildung 116: Streudiagramm der mittleren jährlichen Schwebstoffkonzentration in der Elbe (Daten WSV) und der mittleren jährlichen Sohländerung in der Krückau**

Dieser Zusammenhang lässt sich phänomenologisch beschreiben (vgl. Abschnitt 4.4.1.3). Allerdings ergibt der Vergleich der Erkenntnisse aus den Messungen mit den Erkenntnissen aus den Sensitivitätsuntersuchungen teilweise widersprüchliche Aussagen. Während aus den Messungen hervorgeht, dass der Korrelationskoeffizient in Richtung Unterstrom kleiner wird, haben die Sensitivitätsuntersuchungen gezeigt, dass vor allem der untere Gewässerabschnitt (km 10,5 – km 7,5) besonders stark auf eine schwankende Schwebstoffkonzentration reagiert. Im mittleren Gewässerabschnitt (km 7,5 – km 3,5) sind nur noch geringe und im oberen Gewässerabschnitt fast keine Auswirkungen mehr nachweisbar.

Ein möglicher Grund für die fehlende Korrelation in Abschnitt A5 und die teilweise nur schwache Korrelation sind die geringen Änderungsraten der Sohlhöhe, die im Bereich der Messgenauigkeit liegen. Zum anderen sind Messbereich und Modellgebiet nicht deckungsgleich. Das Modellgebiet umfasst beispielsweise auch Priele, Gräben und die kompletten Böschungen. Der Messbereich ist hingegen auf den Bereich der Krückau, der Sohlhöhen unterhalb von 0,5 m ü. NHN aufweist beschränkt, d.h. dass nur ein Teil der Böschungen abgedeckt ist. Die Gräben und Priele sind gar nicht in den Messdaten berücksichtigt.

Gegen diesen simplen Ansatz, der die morphologische Entwicklung auf einen einzigen Faktor reduziert, sprechen die Erkenntnisse aus den Sensitivitätsuntersuchungen. Diese belegen, dass neben der Schwebstoffkonzentration des Flutstromes auch noch weitere Faktoren, wie z.B. der Oberwasserzufluss, einen Einfluss auf die Entwicklung der Sohlhöhen haben. Ein höherer Abfluss begünstigt also in einigen Abschnitten die Erosion (u.a. km 0,5 – km 3,5).

In Abbildung 117 wird deutlich, dass für die Abschnitte A2, A3 und A4 ebenfalls eine schwache negative Korrelation zwischen der Sohlhöhenänderung und dem mittleren Oberwasserzufluss besteht.



**Abbildung 117: Abschnittsweise gemittelte Sohlhöhenänderungen im Unterlauf der Krückau sowie der mittlerer Jahresabfluss am Pegel A23 (Abflussdaten: LKN-SH)**

Eine abschließende Beurteilung der Zulässigkeit einer stark vereinfachten Beschreibung der Abhängigkeitsstrukturen in der morphologischen Entwicklung der Krückau in Form einzelner Parameter ist an dieser Stelle nicht möglich. Hierzu sind weitere Untersuchungen, wie u.a. die Fortführung der jährlichen Vermessung der Sohltopographie und Sensitivitätsstudien mit hydrodynamisch-numerischen Modellen, zwingend erforderlich. Grundsätzlich wäre die Entwicklung vergleichsweise einfacher Modelle sehr hilfreich um aktuelle und künftige Fragestellungen im Bereich der Nebenflüsse zu bearbeiten und z.B. mögliche Auswirkungen von Anpassungen in der Unterelbe auf die Nebenflüsse abschätzen zu können.

#### 4.5 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Die zwölf größten Nebenflüsse der Unterelbe entwässern ein Einzugsgebiet von 9.826 km<sup>2</sup>, was in etwa 75% des Einzugsgebietes der Unterelbe entspricht. Acht der zwölf Nebenflüsse haben tidebeeinflusste Unterläufe mit einer Länge zwischen 4,6 km (Schwinge) und 70 km (Stör). Die weiteren Nebenflüsse sind durch Bauwerke dauerhaft vom Tidegeschehen in der Elbe entkoppelt.

Alle Unterläufe der Nebenflüsse gelten heute als mäßig bis stark verändert (Berichtsportal WasserBLICK/BFG 2009). Zu den Veränderungen zählen u.a. ein stark begradigter und eingedeichter Unterlauf, ein Mündungssperrwerk zum Schutz vor Sturmfluten und ein tiefliegendes Deichhinterland, das mit Hilfe von Schöpfwerken entwässert wird. Diese Veränderungen beeinflussen u.a. das natürliche Abflussgeschehen sowie die natürliche Tide- und Sedimentdynamik.

In diesem Kapitel wurden zwei der drei Hauptfragestellungen dieser Arbeit bearbeitet. Zum einen wurden extreme Ereignisse, die hohe Wasserstände auf der Binnenseite der Sperrwerke hervorrufen, beschrieben und statistisch eingeordnet, zum anderen wurden die Morphodynamik sowie die morphologische Entwicklung in den Unterläufen analysiert. Die Grundlage hierfür bildet die

detaillierte Beschreibung der derzeitigen wasserwirtschaftlichen Situation sowie die Charakterisierung der Nebenflüsse anhand morphologischer Merkmale und hydrologischer Grundlagen (Niederschläge, Abflüsse, Wasserstände und Strömungen). Die grundsätzliche Beschreibung erfolgte für alle Nebenflüsse. Detaillierte Analysen wurden beispielhaft für die beiden ausgewählten Fokusgewässer Este und Krückau durchgeführt.

Hohe Wasserstände in den Unterläufen der Nebenflüsse werden durch den Aufstau des Binnenabflusses bei geschlossenem Sperrwerk hervorgerufen. Die Höhe des Wasserstands auf der Binnenseite des Sperrwerks hängt von dem zur Verfügung stehenden Stauraum hinter dem Sperrwerk, dem Zufluss aus dem Einzugsgebiet und Eintrag über die Schöpfwerke, dem Schließwasserstand sowie der Dauer der Sperrung ab.

Der Stauraum hinter dem Sperrwerk wird bestimmt durch die Topographie des Gewässers, die Höhe und die Größe der Deichvorländer sowie den Schließwasserstand der Sperrwerke. Der Schließwasserstand ist in der jeweiligen Schließordnung des Sperrwerks festgelegt. Der Zufluss aus dem Einzugsgebiet wird bestimmt durch den Binnenabfluss aus dem Einzugsgebiet des Oberlaufes, der mit dem natürlichen Gefälle entwässert und durch die Pumpleistung der Schöpfwerke, die das Deichhinterland entwässern. Die Dauer der Sperrung hängt vom Verlauf des Sturmflutwasserstands in der Elbe ab. Dabei sind insbesondere die Tiefpunkte der Wasserstandsganglinie, also die Tideniedrigwasser, von entscheidender Bedeutung.

In der derzeitigen wasserwirtschaftlichen Praxis werden zum Zweck der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen und der Ausweisung von Überschwemmungsgebieten Annahmen bezüglich der Größe des Zuflusses und der Dauer der Sperrung getroffen. Die Größe des Zuflusses aus dem Einzugsgebiet des Oberlaufes wird durch ein Hochwasserereignis einer bestimmten Jährlichkeit beschrieben. Die Dauer der Sperrung ergibt sich aus einer angenommenen Kettentide in der Elbe, die aus einer Abfolge mehrerer hoher Tnw und Thw besteht. Diese sind so hoch, dass keine oder nur eine eingeschränkte Entwässerung möglich ist.

In Anlehnung an die wasserwirtschaftliche Praxis wurden zwei Lastfälle näher betrachtet. Lastfall A besteht aus der Kombination HQ<sub>5</sub> mit einer Sperrung über zwei Thw und ein Tnw. Lastfall B besteht aus der Kombination HQ<sub>5</sub> mit einer Sperrung über drei Thw und zwei Tnw.

Eine statistische und phänomenologische Betrachtung zeigte, dass die Kombination aus hohen Abflüssen und hohen Tidewasserständen als rein zufällig betrachtet werden kann. Dementsprechend sind die Wiederkehrintervalle der einzelnen Komponenten zunächst separat zu bestimmen und anschließend miteinander zu multiplizieren. Die Wiederkehrintervalle wurden auf der Grundlage univariater (Lastfall A) und bivariater (Lastfall B) Auswertungen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 23 zusammengefasst.

**Tabelle 23: Kombinierte Wiederkehrintervalle der Lastfälle A und B**

<b>Pegel / Fluss</b>	<b>Lastfall A (HQ<sub>5</sub>, ein gesperrtes Tnw)</b>	<b>Lastfall B (HQ<sub>5</sub>, zwei gesperrte Tnw)</b>
Cranz/Este	275 Jahre	15.500 Jahre
Kollmar/ Krückau	125 Jahre	10.675 Jahre

Die Morphodynamik und die morphologische Entwicklung der Unterläufe der Nebenflüsse werden im Wesentlichen geprägt durch die Tide- und Schwebstoffdynamik der Elbe, den Binnenabfluss und die

Schwebstoffzufuhr aus dem Einzugsgebiet sowie die Eigenschaften der Schwebstoffe und der Sohlsedimente.

Die Morphodynamik sowie die morphologische Entwicklung in den Unterläufen der Krückau und der Este wurden auf der Grundlage von Messdaten und Modellergebnissen beschrieben.

Die Schwebstoffkonzentration im Mündungsbereich von Este und Krückau wurde im Rahmen einer mehrwöchigen Messkampagne erfasst. Die Auswertung zeigt, dass die gemessene Konzentration in der Krückau im Mittel der Konzentration an der Dauermessstation D3 in der Elbe (nahe der Krückau Mündung) entspricht. Indessen ist die gemessene Konzentration in der Este im Mittel fast fünfmal höher als die Konzentration an der Dauermessstation D1 in der Elbe (nahe der Este Mündung).

Die gemessene Schwebstoffkonzentration im Mündungsbereich der Este ist im Mittel deutlich höher als in der Krückau. Bei der alleinigen Betrachtung der Lage ist dies nicht zu erwarten, da die Mündung der Krückau deutlich näher am Maximum der Trübungszone ist als die Mündung der Este. Der Verlauf der Schwebstoffganglinien ist an beiden Flüssen weitgehend vergleichbar. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich etwa zur Hälfte des Flutstromes. In dieser Phase fällt die Schwebstoffkonzentration in der Krückau deutlich stärker ab als in der Este.

Mit Hilfe hydrodynamisch-numerischer Modelle wurde die Dynamik der Schwebstoffe in den Unterläufen unter mittleren Tide- und Abflussverhältnissen simuliert. Dabei wurden die im Bereich der Sperrwerke gemessenen Schwebstoffkonzentrationen über den unteren Modellrand eingesteuert. Die am oberen Modellrand eingesteuerten Schwebstoffkonzentrationen stammen ebenfalls aus Messungen. Auch hier zeigten sich große Unterschiede zwischen den beiden Nebenflüssen. In diesem Fall ist es die Krückau, die bei mittlerem Abfluss (MQ) eine neunmal höhere Schwebstoffkonzentration hat als die Este.

Die Modellberechnungen zeigten, dass das Konzentrationsmaximum der Este bei mittleren Tideverhältnissen zwischen dem Inneren und dem Äußeren Este-Sperrwerk liegt. Im weiteren Verlauf vom Inneren Este-Sperrwerk (km 11,0) bis km 4,0 nimmt die Schwebstoffkonzentration kontinuierlich ab. Zwischen km 4,0 und dem Buxtehuder Hafen entspricht die mittlere Schwebstoffkonzentration in etwa der Konzentration des Oberwasserzuflusses. Das Konzentrationsmaximum der Krückau befindet sich bei Seestermühe (km 7,0). Zwischen km 7,0 und dem Elmshorner Hafen (km 0) nimmt die mittlere Schwebstoffkonzentration nur leicht ab, was vor allem auf die hohe Konzentration des Oberwasserzuflusses zurückzuführen ist.

Unter den betrachteten Rahmenbedingungen (mittlere Tide- und Abflussverhältnisse) werden sowohl im Unterlauf der Este als auch im Unterlauf der Krückau Schwebstoffe akkumuliert. Allerdings wird in der Este (38,7 t pro Tide) deutlich mehr Material abgelagert als in der Krückau (2,7 t pro Tide). Der Unterschied ist im Wesentlichen auf die deutlich höhere Schwebstoffkonzentration bei Flutstrom zurückzuführen. Der Großteil des in die Este importierten Materials (~ 31,0 t pro Tide) wird zwischen dem Äußeren und dem Inneren Este-Sperrwerk abgelagert. Indessen hat die Krückau zwei Ablagerungsschwerpunkte; einen im Nahbereich des Sperrwerks (~ 3,5 t pro Tide) und einen im Bereich des Elmshorner Hafens (~ 1,5 t pro Tide).

Das Verhältnis der Schwebstofftransportraten bei Flut und bei Ebbe im Bereich der Mündungen zeigt das Verhalten des jeweiligen Nebenflusses in der Wechselbeziehung zwischen Elbe und Nebenfluss. In die Este wird bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen mit der Flut deutlich mehr Material aus der Elbe hineintransportiert als mit der Ebbe heraustransportiert wird. Demzufolge wirkt die Este

dämpfend auf den Schwebstoffgehalt in der Eibe. In die Krückau wird unter den betrachteten Rahmenbedingungen weniger Material mit der Flut hineintransportiert als mit der Ebbe heraustransportiert wird. Demzufolge erhöht die Krückau den Schwebstoffgehalt in der Eibe. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Schwebstoffgehalt des Oberwasserzuflusses der Krückau vergleichsweise hoch ist.

Die morphologische Entwicklung der Unterläufe von Este und Krückau wird wesentlich von der Schwebstoffkonzentration des Flutstromes beeinflusst. Die Stärke des Einflusses nimmt mit zunehmender Entfernung von der Mündung ab. Besonders stark beeinflusst sind die unteren drei Gewässerkilometer. Im mittleren Abschnitt ist der Einfluss geringer. Im oberen Abschnitt sind praktisch keine Auswirkungen mehr festzustellen.

Bei mittlerem Hochwasserabfluss (MHQ) werden die Unterläufe von Este und Krückau zu Sedimentexporteuren. In den meisten Abschnitten ruft der Hochwasserabfluss eine deutliche Erosion hervor. Davon ausgenommen sind die Abschnitte in unmittelbarer Sperrwerksnähe, die stärker verlanden. In der Krückau existieren noch einige weitere Abschnitte, die stärker verlanden, allen voran der Elmshorner Hafen. In der Este führt ein erhöhter Oberwasserzufluss (MHQ) dazu, dass alle Abschnitte mit Ausnahme des Abschnitts zwischen dem Äußeren und dem Inneren Este-Sperrwerk (km 12,5 – km 11,5) von der Erosion dominiert werden.

Aus den gesammelten Erkenntnissen lassen sich u.a. Rückschlüsse auf die Herkunft der Schwebstoffe ziehen. Die Schwebstoffe, die sich im Elmshorner Hafen ablagern, werden überwiegend mit dem Oberwasserzufluss eingetragen. Die Schwebstoffe, die sich im Bereich des Krückau-Sperrwerks ablagern, stammen überwiegend aus der Eibe. Schwebstoffe, die sich in der Este ablagern stammen ebenfalls zum Großteil aus der Eibe.

Zur Beschreibung der morphologischen Entwicklung der Gewässersohle im Unterlauf der Krückau wurden neben den Modellergebnissen auch Messdaten analysiert. Der ausgewertete Datensatz enthält Daten aus jährlichen Fächerlotpeilungen im Zeitraum 2006 – 2015. Aus der Auswertung der Sohlhöhen geht ein Anstieg der mittleren Sohlhöhe seit 2006 hervor. In der oberen Hälfte (km 5,5 – km 0) ist der Anstieg am deutlichsten (0,2 - 0,3 m). Ab der Mitte des Unterlaufs (km 5,5) fällt der Anstieg geringer aus.

Eine detaillierte Betrachtung der Querschnitte zeigte, dass die Veränderungen der mittleren Sohlhöhe im Wesentlichen auf die Änderungen der Sohlhöhen im Böschungsbereich zurückzuführen ist. Der Bereich um den Talweg ist mit einer Ausnahme stabil. Die Ausnahme bildet der Elmshorner Hafen, der sowohl im Bereich des Talweges als auch im Bereich der Böschungen verlandet.

Der zeitliche Verlauf der Sohlentwicklung zeigt, dass das heutige höhere Sohlniveau auf hohe Auflandraten in den Jahren 2007 - 2009 (bzw. 2007 – 2010) zurückzuführen ist. Betrachtet man nur die Jahre nach 2010, dann ist entweder keine Tendenz (km 1,0 – km 0,0, km 9,5 – km 7,6) oder sogar eine leicht negative Tendenz (km 7,6 – km 1,0) erkennbar.

Für einige Bereiche liefern sowohl die Analysen der Modelldaten als auch die Analysen der Messdaten Erkenntnisse zur Sohlentwicklung. In diesen Fällen waren die Aussagen von der Tendenz her weitgehend deckungsgleich. Die wesentlichen Aspekte sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

**Tabelle 24: Zusammenfassung der Erkenntnisse zur morphologischen Entwicklung der Sohlhöhen im Unterlauf der Krückau**

Bereich	Erkenntnis aus Messungen	Erkenntnis aus Modellierung
Elmshorner Hafen	Verlandungstendenz	Verlandungstendenz
Nahbereich Sperrwerk	Tendenziell Verlandungstendenz, Messungen beeinflusst durch Unterhaltungsmaßnahmen	Verlandungstendenz
Bereich Talweg	Sohlhöhen sind in der oberen Hälfte stabiler als in der unteren Hälfte	Simulationszeitraum zu kurz
Bereich Talweg	Wenn Änderungen, dann überwiegend Erosion	Wenn Änderungen, dann überwiegend Erosion
Lokale Tiefpunkte (Prallhänge einiger Krümmungen)	Besonders stabil	Simulationszeitraum zu kurz
Böschungen	Stabil / leichte Verlandungstendenz	Deutliche Verlandungstendenz
Gesamter Unterlauf	Verlandungstendenz 2006 – 2010, keine/ leichte Erosionstendenz 2010 – 2015	Simulationszeitraum zu kurz

Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Auffälligkeit entdeckt. Aus der Gegenüberstellung der gemittelten Sohländerungsraten für den Krückau Abschnitt (km 7,6 – km 0,0) mit der mittleren Schwebstoffkonzentration in der Elbe nahe der Krückau Mündung geht ein ähnliches Verhaltensmuster hervor. In Jahren mit einer hohen Schwebstoffkonzentration tendiert der Abschnitt zur Verlandung. In Jahren mit einer niedrigen Schwebstoffkonzentration tendiert der Abschnitt zur Erosion. Der Korrelationskoeffizient beträgt  $r = 0,58$ .

Ob es sich hierbei tatsächlich um einen echten kausalen Zusammenhang handelt oder um Zufall, konnte nicht abschließend beurteilt werden. Der anhand der Messdaten ermittelten Korrelation stehen Erkenntnisse aus der Modellierung gegenüber, die den phänomenologischen Zusammenhang nur für Teile des Unterlaufs bestätigen. Daher sind weitere Untersuchungen, wie u.a. die Fortführung der jährlichen Vermessung der Sohltopographie und weitere Modelluntersuchungen zwingend erforderlich.

Grundsätzlich wäre die Entwicklung vergleichsweise einfacher Modelle sehr hilfreich um aktuelle und künftige Fragestellungen im Bereich der Nebenflüsse zu bearbeiten und z.B. mögliche Auswirkungen von Anpassungen in der Unterelbe auf die Nebenflüsse abschätzen zu können.

## 5. Auswirkungen des Klimawandels

Es ist davon auszugehen, dass sowohl die Unterelbe als auch deren Nebenflüsse vom Klimawandel und dessen unmittelbaren Auswirkungen, wie dem Meeresspiegelanstieg, betroffen sein werden. Der Binnenabfluss dieser Flüsse wird maßgeblich von den Niederschlägen über dem Einzugsgebiet geprägt, während die Wasserstände im tidebeeinflussten Bereich durch den mittleren Meeresspiegel beeinflusst werden. Dementsprechend haben Veränderungen des Niederschlagsgeschehens und des Meeresspiegels Auswirkungen auf die Hydrodynamik und die Morphodynamik in den Flüssen.

Im Folgenden werden am Beispiel von Este und Krückau drei konkrete Aspekte betrachtet:

- i) Auswirkungen veränderter Klimaparameter auf den Binnenabfluss,
- ii) Auswirkungen eines veränderten Binnenabflusses und eines veränderten Meeresspiegels auf die statistische Einordnung seltener Schließereignisse,
- iii) Auswirkungen eines veränderten Meeresspiegels auf den Sedimenttransport in den tidebeeinflussten Unterläufen.

Um konkrete Aussagen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Nebenflüsse treffen zu können, bedarf es zum einen eines umfassenden Systemverständnisses sowie geeigneter Instrumente und zum anderen fundierter Grundlagen bezüglich des zu erwartenden Ausmaßes der Veränderung der Rahmenbedingungen (Klimaparameter, Meeresspiegel).

Das erforderliche Systemverständnis sowie die Instrumente in Form von Modellen gehen aus der wasserbaulichen Systemanalyse hervor (Kapitel 4). Der in diesem Zusammenhang beschriebene Ist-Zustand für hydrologische, hydrodynamische und morphodynamische Größen eignet sich außerdem als Referenz im Rahmen einer Gegenüberstellung mit möglichen zukünftigen Zuständen (Szenarien).

Die Grundlagen bezüglich der Veränderungen der Klimaparameter bilden Modellergebnisse des Regionalen Klimamodells REMO. Eine Beschreibung des Modells ist zu finden in (Jacob und Podzun 1997, Jacob 2001). Konkret werden drei Realisierungen des A1B Szenarios (Jacob et al. 2012) betrachtet, die im Folgenden als REMO A1B – Ensemble bezeichnet werden. Die Klimaparameter werden als Antrieb für Simulationen auf der Grundlage der N-A-Modelle der Einzugsgebiete der Nebenflüsse verwendet.

Die Grundlagen bezüglich des Meeresspiegelanstiegs bilden ein Literaturstudium in Verbindung mit der Analyse von Modellergebnissen eines hydrodynamisch-numerischen Modells des Elbe-Ästuars. Mit Hilfe dieses Modells wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Sensitivitätsstudien zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels durchgeführt (Holzwarth et al. 2011, Schulte-Rentrop und Rudolph 2011). Aus den Analysen gehen Erkenntnisse zur Veränderung der Tidekennwerte ( $T_{nw}$ ,  $T_{hw}$ ,  $T_{hb}$ ) im Bereich der Mündungen der Nebenflüsse hervor. Auf Basis dieser Informationen werden Zeitreihen des Wasserstands generiert, die als Randbedingung am unterstromigen Modellrand der hydrodynamisch-numerischen Modelle der Nebenflüsse eingesteuert werden.

## 5.1 Klimawandel und Meeresspiegelanstieg

Sowohl das Klima als auch der mittlere Meeresspiegel sind keine Konstanten, sondern unterliegen ständigen Schwankungen und Veränderungen. Viele wissenschaftliche Untersuchungen deuten darauf hin, dass in den kommenden Jahrzehnten mit einer zunehmenden Beschleunigung der Veränderungen zu rechnen ist.

Das Klima wird durch eine Vielzahl von sich überlagernden Prozessen und Mechanismen beeinflusst. Diese Prozesse können von natürlichen (z.B. Vulkanausbrüche) und anthropogenen (z.B. Treibhausgasemissionen) Faktoren beeinflusst werden. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (kurz: IPCC) kommt in seinem vierten Sachstandsbericht zu dem Schluss, dass die Erwärmung der Erdatmosphäre seit der Mitte des 20. Jahrhunderts nur unter Berücksichtigung der anthropogenen Emissionen zu erklären ist, d.h. dass ein Großteil der Erwärmung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die menschlichen Aktivitäten zurückzuführen ist (IPCC 2007).

Der mittlere Meeresspiegel (MSL) wird auf unterschiedliche Weise vom Klima beeinflusst. Der Anstieg der Temperaturen in der Atmosphäre führt u.a. zu einer Erwärmung des Wassers in den Ozeanen, das sich in der Folge ausdehnt (thermischer Anstieg). Außerdem wird durch höhere Temperaturen das Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde beschleunigt, wodurch das Wasservolumen insgesamt erhöht wird (eustatischer Anstieg). Beides führt zu einem höheren Meeresspiegel.

### 5.1.1 Klimawandel und Klimamodellierung

Mögliche zukünftige Entwicklungen des Klimas werden u.a. mit Klimamodellen berechnet. Die Modelle, die von verschiedenen Klimaforschungsinstitutionen entwickelt wurden, werden genutzt, um die Auswirkungen definierter Szenarien in Bezug auf die Emission von Treibhausgasen und Aerosolen auf die künftige Klimaentwicklung abzubilden. Die SRES Emissionsszenarien (Nakićenović 2000) A1B, A2, und B1 legen mögliche Pfade globaler demografischer, sozioökonomischer und technologischer Entwicklungen zu Grunde. Bei den Emissionsszenarien handelt es sich um Annahmen, weshalb die modelltechnisch ermittelten Klimaänderungen als Projektionen bezeichnet werden. Mittlerweile wurden die SRES Szenarien durch repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways – RCPs) (Moss 2008) ersetzt.

Klimamodelle beschreiben die physikalischen Prozesse im Klimasystem auf globaler oder auch regionaler Ebene. Aus Gründen des Rechenaufwands ist die räumliche Auflösung der Globalmodelle relativ grob (Gitterweite 100 - 300 km). Um den Einfluss der globalen Klimaänderungen auf bestimmte Regionen genauer zu untersuchen, werden regionale Klimamodelle mit einer Gitterweite von 10-25 km in die Globalmodelle eingebettet.

Jede Konfiguration aus Emissionsszenario, Globalmodell und Regionalmodell liefert als Ergebnis eine mögliche Entwicklung des Klimas. Aus der wiederholten Kombination unterschiedlicher Globalmodelle mit Regionalmodellen unter Annahme unterschiedlicher Antriebe resultiert schließlich eine Bandbreite von Ergebnissen, die die möglichen Klimaänderungen beschreiben.

Eine wesentliche Grundlage für die systematische Abschätzung von Bandbreiten bilden die internationalen Forschungsprojekte PRUDENCE (Christensen et al. 2007b) und ENSEMBLES (van der Linden und Mitchell 2009). Im Ergebnis ergeben sich aus den beiden Projekten für Europa

regionalisierte Klimaprojektionen, die in Datenbanken für weitergehende Untersuchungen, wie z.B. die Impaktmodellierung, verfügbar sind. Mittlerweile existieren für Europa und Deutschland zahlreiche weitere Klimaprojektionen (Jacob et al. 2012), die in deutlich höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung zur Verfügung stehen und dadurch Untersuchungen von kleinräumigen Bereichen und zeitlich hochaufgelösten Prozessen zulassen.

Für den Raum Norddeutschland liefert das regionale Klimamodell REMO bis dato Ergebnisse mit der höchsten räumlichen (Gitterweite 10 km) und zeitlichen (1h) Auflösung. In dieser Qualität eignen sich die Ergebnisse auch zur Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels in kleinen Flusseinzugsgebieten mit kurzen Reaktionszeiten, wie z.B. die Einzugsgebiete von Este und Krückau. Die Ergebnisse der Klimamodelle dienen dabei als Antrieb für Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) der Einzugsgebiete.

Derzeit stehen je Szenario (A2, A1B, B1) drei Realisierungen durch REMO zur Verfügung (Jacob et al. 2008, Jacob et al. 2009, Jacob et al. 2012). Bei jeder Realisierung umfasst der Simulationszeitraum 150 Jahre (1951-2100). Die Ergebnisse für dem Zeitraum 1951-2000 dienen als Referenz bei der Gegenüberstellung mit Ergebnissen aus anderen Zeiträumen. Meistens umfassen die betrachteten Zeitspannen 30 Jahre, manchmal auch 50 Jahre. Der minimale Zeitraum von 30 Jahren ergibt sich aus den Eigenschaften des Klimas, wie z.B. interne Schwankungen.

### **5.1.2 Projizierte Änderungen der Klimaparameter für die Einzugsgebiete der Nebenflüsse**

Für Norddeutschland existiert eine Reihe an Klimasimulationen, die mit Hilfe von numerischen Modellen durchgeführt und von unterschiedlichen Emissionsszenarien angetrieben werden.

In (Rechid et al. 2014) sind die Auswertungen von insgesamt 13 Realisierungen der SRES Emissionsszenarien A2, A1B und B1 durch die regionalen Klimamodelle REMO und COSMO-CLM (Rockel et al. 2008) für die Metropolregion Hamburg (MRH) sowie für Teilgebiete der MRH dargestellt. Der Antrieb der beiden Regionalmodelle erfolgt durch Randbedingungen aus dem Globalmodell *ECHAM5-MPIOM* (Roeckner 2013).

Im Folgenden werden die Ergebnisse für den westlichen Teil der MRH betrachtet. Dieser Bereich deckt einen Großteil der Einzugsgebiete der Nebenflüsse der Unterelbe ab. Die wesentlichen Ergebnisse hinsichtlich der Temperaturänderungen sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Den Auswertungen zur Folge sind bereits ab Mitte des 21. Jahrhunderts steigende Temperaturen zu erwarten, wobei der Anstieg im Winter höher ausfällt als in den übrigen Jahreszeiten. Zum Ende des Jahrhunderts fällt der Anstieg noch deutlicher aus, wobei sich die stärkste Zunahme wiederum im Winter ergibt.

**Tabelle 25: Berechnete Änderungen der mittleren Temperaturen in der westlichen Metropolregion Hamburg gegenüber 1971 – 2000 (nach Rechid et al. 2014)**

Änderung der mittleren Temperaturen in K	2036 – 2065	2071 -2100
Winter	1,1 – 2,9	2,4 - 4,3
Frühling	0,2 – 1,7	1,2 – 3,2
Sommer	0,8 – 1,6	1,4 – 3,0
Herbst	0,8 – 2,1	1,9 – 3,1
Jahr	0,9 – 2,0	1,9 - 3,3

Auch für den Niederschlag sind zukünftig Änderungen zu erwarten. Allerdings sind die Ergebnisse differenzierter. Bezüglich der Jahresniederschlagssummen zeigt sich bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts eine Zunahme, die vor allem aus einer deutlichen Zunahme der Niederschlagssummen im Winter, Frühling und Herbst resultiert. Demgegenüber steht der Sommer, für den einige Realisierungen der Szenarien (B1 und A1B) sogar eine Abnahme (-10,1% - 5,7%) anzeigen. Zum Ende des Jahrhunderts weisen die Ergebnisse auf eine deutliche Zunahme der Jahresniederschlagssummen hin. Allerdings zeigen auch hier die meisten Realisierungen im Sommer eine Abnahme der Niederschlagssummen und in den übrigen Jahreszeiten eine Zunahme.

**Tabelle 26: Berechnete Änderungen der mittleren Niederschlagsmenge in der westlichen Metropolregion Hamburg gegenüber 1971 – 2000 (nach Rechid et al. 2014)**

Änderung der mittleren Niederschlagssumme in %	2036 - 2065	2071 -2100
Winter	2,2 – 20,1	11,7 – 39,8
Frühling	0,4 – 20,7	6,4 – 22,7
Sommer	-10,1 – 5,7	-22,4 – 7,5
Herbst	-0,2 – 29,2	4,9 – 29,9
Jahr	1,3 – 16,2	1,8 – 23,4

Neben den Niederschlagssummen betrachten (Rechid et al. 2014) auch die Intensitäten von Niederschlägen. Hier zeigt sich für den Winter eine generelle Zunahme der Niederschlagsintensitäten in allen Klassen. Dabei ist die Zunahme zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich ausgeprägter als zur Mitte des Jahrhunderts. Im Sommer nehmen die Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten (Tagessumme >10 mm) zu, während Ereignisse mit niedrigen und mittleren Intensitäten abnehmen. Wie für den Winter ist die Zunahme zum Ende des Jahrhunderts ausgeprägter.

Die dargestellten Bandbreiten gehen aus den Ergebnissen des von (Rechid et al. 2014) betrachteten Ensembles hervor und stellen den Stand zu einem bestimmten Zeitpunkt dar. Mit jeder weiteren Realisierung, die zukünftig hinzukommt, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Bandbreiten verändern.

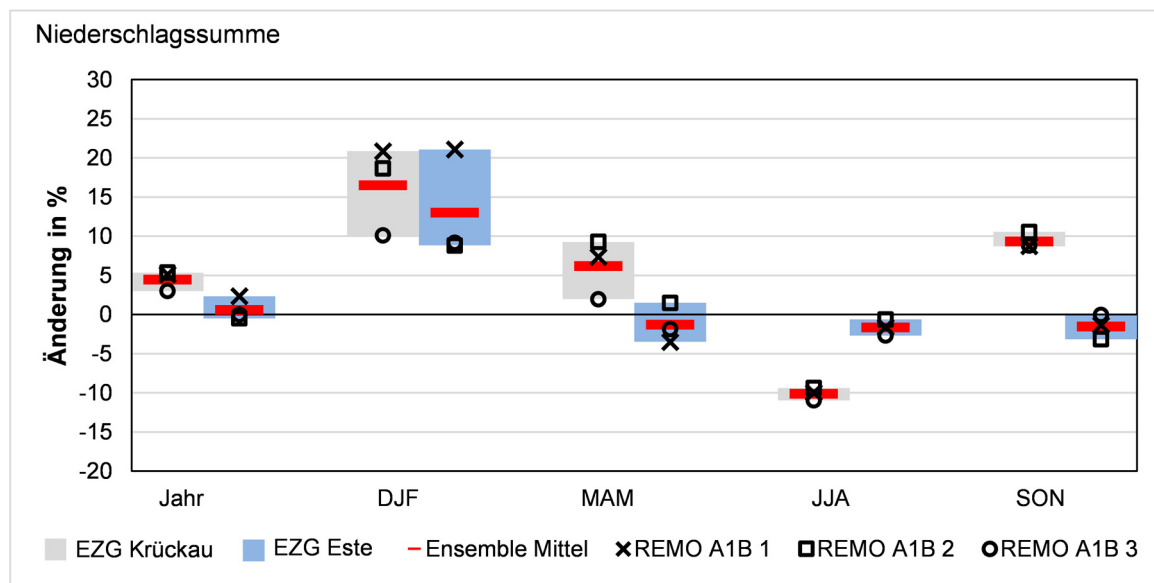
In Anbetracht des großen Aufwands, den die Analyse der Auswirkungen eines einzelnen Datensatzes auf den Abfluss im Gewässer derzeit erfordert, ist es momentan wenig sinnvoll, alle Realisierungen, die von (Rechid et al. 2014) betrachtet wurden, in die weiteren Untersuchungen einzubeziehen. Stattdessen erscheint eine überlegte Selektion weniger Realisierungen weitaus sinnvoller, um einerseits eine erste Einschätzung der Bandbreiten zu erhalten und um andererseits Erfahrungen zu gewinnen, die im Rahmen einer später anzustrebenden Automatisierung der Analyse eingesetzt werden können.

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die modellinterne Variabilität näher analysiert. Dazu wird der Einfluss der Modellkonfiguration (u.a. Parametrisierungen, Initiallösungen) eines Modells

auf die Ergebnisse der Impaktmodellierung (in diesem Fall: Abfluss) untersucht. Alle weiteren Einflussfaktoren bleiben unverändert. Für die weiteren Untersuchungen werden dazu die ersten drei Realisierungen des Regionalen Klimamodells REMO für das SRES Emissionsszenario A1B (REMO A1B 1, REMO A1B 2, REMO A1B 3 (Jacob et al. 2012), im Folgenden als REMO A1B – Ensemble bezeichnet) zugrunde gelegt.

Die projizierten Tagesniederschläge im Gebietsmittel der Einzugsgebiete von Este und Krückau sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 118 zeigt die projizierten Änderungen der mittleren jährlichen Niederschlagssummen. Insgesamt nehmen die Jahresniederschläge über dem Einzugsgebiet der Krückau leicht zu und bleiben über dem Einzugsgebiet der Este nahezu unverändert. Die saisonale Betrachtung ergibt für beide Einzugsgebiete eine deutliche Zunahme in den Wintermonaten und eine leichte Abnahme in den Sommermonaten. Trotz der räumlichen Nähe beider Einzugsgebiete zeigen sich im Frühling und im Herbst gegensätzliche Änderungssignale. Für das nordwestlich in der MRH gelegene Einzugsgebiet der Krückau zeigt sich jeweils eine leichte Zunahme, während sich für das südlich in der MRH gelegene Einzugsgebiet der Este eine leichte Abnahme zeigt.

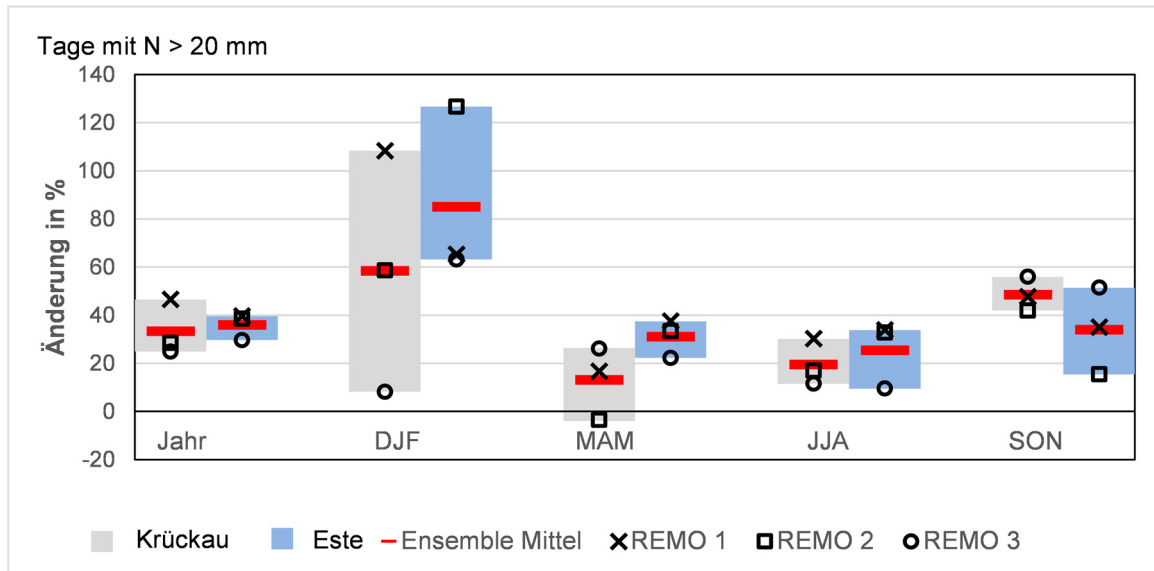
Für Sommer, Herbst sowie das gesamte Jahr sind die Bandbreiten der Änderungssignale innerhalb des betrachteten Ensembles vergleichsweise gering. Für den Winter und den Frühling sind die Bandbreiten größer und betragen bis zu zehn Prozent. Insgesamt weisen alle betrachteten Modellergebnisse dieselbe Tendenz auf, d.h. die Änderungssignale sind als robust einzustufen.



**Abbildung 118: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen 2051 – 2100 gegenüber 1951 – 2000 für das REMO A1B – Ensemble und Werte der einzelnen Simulationen des Ensembles für die Gebietsmittel der Einzugsgebiete von Este und Krückau**

Abbildung 119 zeigt die projizierten Änderungen der Anzahl der Starkregentage, d.h. Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag. Insgesamt nimmt die Anzahl über beiden Einzugsgebieten um rund 35% zu. Die absolute Anzahl der Starkregentage pro Jahr steigt von knapp 4 Tagen im Zeitraum 1951-2000 auf 5,5 im Zeitraum 2051-2100. Aus der saisonalen Betrachtung geht hervor, dass in den Wintermonaten die mit Abstand deutlichste Zunahme stattfindet. Allerdings nimmt die Zahl der Starkregentage auch in den anderen Jahreszeiten deutlich zu.

Die größten Bandbreiten ergeben sich für den Winter. Insgesamt sind die Änderungssignale für alle Jahreszeiten und das gesamte Jahr robust. Die einzige Ausnahme davon bildet das Änderungssignal für den Frühling über dem Einzugsgebiet der Krückau. Hier zeigt die zweite Realisierung eine leichte Abnahme, während die anderen beiden Realisierungen eine Zunahme aufweisen.



**Abbildung 119: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Änderung von Tagen mit  $N > 20$  mm, 2051 – 2100 gegenüber 1951 – 2000 für das REMO A1B – Ensemble und Werte der einzelnen Simulationen des Ensembles für die Gebietsmittel der Einzugsgebiete von Este und Krückau**

Die Veränderungen der Temperaturen und des Niederschlagsgeschehens wirken sich auf das Abflussgeschehen aus. Vor allem die Zunahme der Starkregentage lässt auf eine Zunahme der Hochwasserabflüsse in der Este und der Krückau schließen. Die Berechnung der Abflüsse erfolgt auf der Grundlage der numerischen Niederschlag-Abfluss-Modellierung in Abschnitt 5.2.

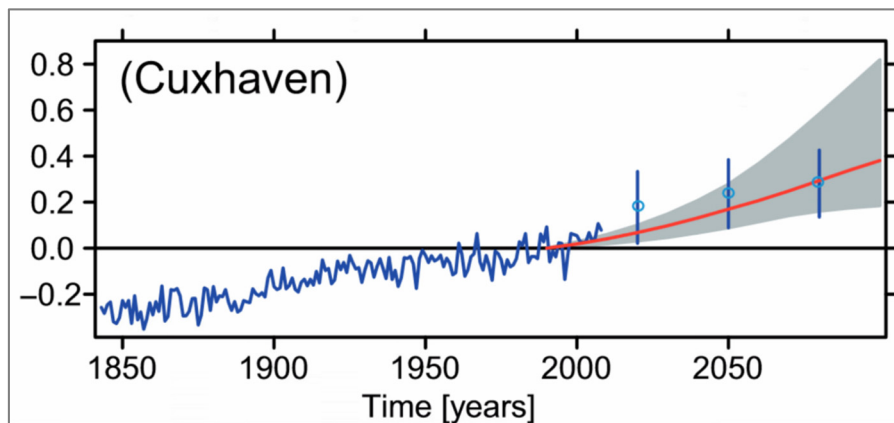
### 5.1.3 Meeresspiegelanstieg

Der Meeresspiegelanstieg wirkt sich global aus. Dementsprechend sind auch die Nordsee und deren Ästuar, wie z.B. das Elbe-Ästuar betroffen. Während sich vergleichsweise viele Studien mit der Entwicklung des globalen Meeresspiegelanstiegs meist in Form des *mean sea level* (MSL) beschäftigen, ist die Anzahl der Studien zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht nicht besonders hoch.

Eine direkte Übertragung der Prognosen zur Veränderung des globalen MSL auf die Deutsche Bucht ist nicht ohne weiteres möglich. Nach den Erkenntnissen von (Lowe et al. 2009) gibt es Abweichungen, da der globale Anstieg im Wesentlichen auf die thermische Ausdehnung zurückzuführen ist, während die räumlichen Muster, wie z.B. in der Deutschen Bucht, hauptsächlich durch Zirkulationsvorgänge und Dichteveränderungen geprägt werden. Diese Abweichungen stellen auch (Jensen et al. 2011) bei ihren Analysen von Wasserstandsdaten des globalen MSL und des MSL in der Deutschen Bucht fest.

Da die Einflussgrößen auf den regionalen Meeresspiegelanstieg sowie mögliche Wechselwirkungen noch nicht umfassend erforscht und verstanden sind, ist die Erstellung von Projektionen zur Entwicklung des regionalen Meeresspiegels, z.B. für die Deutsche Bucht, mit größeren Unsicherheiten

behaftet als die Projektionen des globalen Meeresspiegels. Eine der wenigen Projektionen für die Deutsche Bucht stammt von (Weisse et al. 2014), die den Anstieg des MSL auf der Grundlage einer Kombination aus statistischen Ansätzen und dynamischer Modellierung bestimmen. Dabei werden sowohl Beobachtungsdaten als auch Zukunftsszenarien in die Berechnungen einbezogen. Abbildung 120 zeigt die Projektionen für die Zeithorizonte 2030, 2050 und 2080 gegenüber 1990 für den Pegel Cuxhaven. Der Vergleich mit der Bandbreite der Projektionen zum globalen Anstieg des MSL aus dem vierten IPCC Sachstandsbericht (Meehl et al. 2007) zeigt, dass die Projektion für den kurzfristigsten Zeithorizont bis 2030 deutlich über der Bandbreite des IPCC liegt. Die Projektionen für die ferneren Zeithorizonte 2050 und 2080 nähern sich immer mehr dem Median der IPCC Projektionen für den Anstieg des globalen MSL an.



**Abbildung 120: Beobachtete und projizierte Änderung des MSL gegenüber 1990. Die blauen Kreise mit den vertikalen Linien stellen die Projektionen für den regionalen Anstieg bis 2020, 2050 und 2080 dar. Die graue Fläche umfasst den Bereich zwischen der 5% und der 95% Perzentile der Projektionen des IPCC. Die rote Linie stellt den dazugehörigen Median dar (aus Weisse et al. 2014)**

Eine Plausibilitätsprüfung der Projektion bis 2030 kann anhand der Extrapolation von bekannten Anstiegsraten erfolgen. (Jensen et al. 2011) haben Trends im relativen mittleren Meeresspiegel (Landsenkungen/ -hebungen nicht berücksichtigt) für die deutsche Nordseeküste auf der Grundlage von Pegelaufzeichnungen bestimmt. Für den Pegel Cuxhaven ergeben die Untersuchungen einen positiven Trend von  $2,3 \pm 0,1$  mm pro Jahr (Zeitraum 1843-2008). Für den Zeitraum 1971-2008 ergibt sich ein signifikant höherer Trend von  $3,6 \pm 0,8$  mm pro Jahr (Jensen et al. 2011). Zu derselben Erkenntnis kommen auch (Woodworth et al. 2009).

Unter Annahme des Trends von  $3,6 \pm 0,8$  mm pro Jahr ergibt sich in 40 Jahren ein Anstieg von rund  $0,15 \pm 0,04$  m. Dieser Anstieg liegt etwas unterhalb der Projektion von (Weisse et al. 2014) (rd.  $0,2 \pm 0,2$  m) ist aber grundsätzlich in derselben Größenordnung. Ein Anstieg von 3,6 mm pro Jahr ist laut (Jensen et al. 2011) unter Einbeziehung der gesamten gemessenen Zeitreihe von rd. 150 Jahren nicht als außergewöhnlich einzustufen, da ähnlich hohe Anstiegsraten bereits schon zu früheren Zeitpunkten aufgetreten sind. Dies macht deutlich, dass neben Beobachtungsdaten auch Zukunftsszenarien von (Weisse et al. 2014) berücksichtigt wurden, woraus sich letztendlich der höhere Anstieg ergibt.

Eine Plausibilisierung der Projektionen für spätere Zeitpunkte kann nicht auf der Basis einer Extrapolation erfolgen. (Jensen et al. 2011) schränken den Extrapolationszeitraum z.B. auf wenige Dekaden ein. Grundsätzlich liegen die Angaben von (Weisse et al. 2014) jedoch im Bereich der Angaben des IPCC für den Anstieg des globalen MSL.

Seit der Veröffentlichung des vierten Sachstandsberichtes des IPCC in 2007 äußerten einige Autoren Zweifel an der angegebenen Bandbreite zum Anstieg des globalen MSL. (Pfeffer et al. 2008) halten

einen Anstieg des MSL von bis zu 2 m bis Ende des 21. Jahrhunderts für möglich, wenngleich auch für wenig wahrscheinlich. Eine gute Übersicht der Angaben unterschiedlicher Autoren im Vergleich zu der Bandbreite des vierten Sachstandsberichtes des IPCC ist u.a. in (Nicholls et al. 2010) zu finden. Die voneinander abweichenden Angaben sind auf eine Reihe von Unsicherheitsfaktoren zurückzuführen, wobei ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor das Verhalten der beiden großen Eisschilde über Grönland und der Antarktis ist (u.a. Nicholls et al. 2010 und Parris et al. 2012).

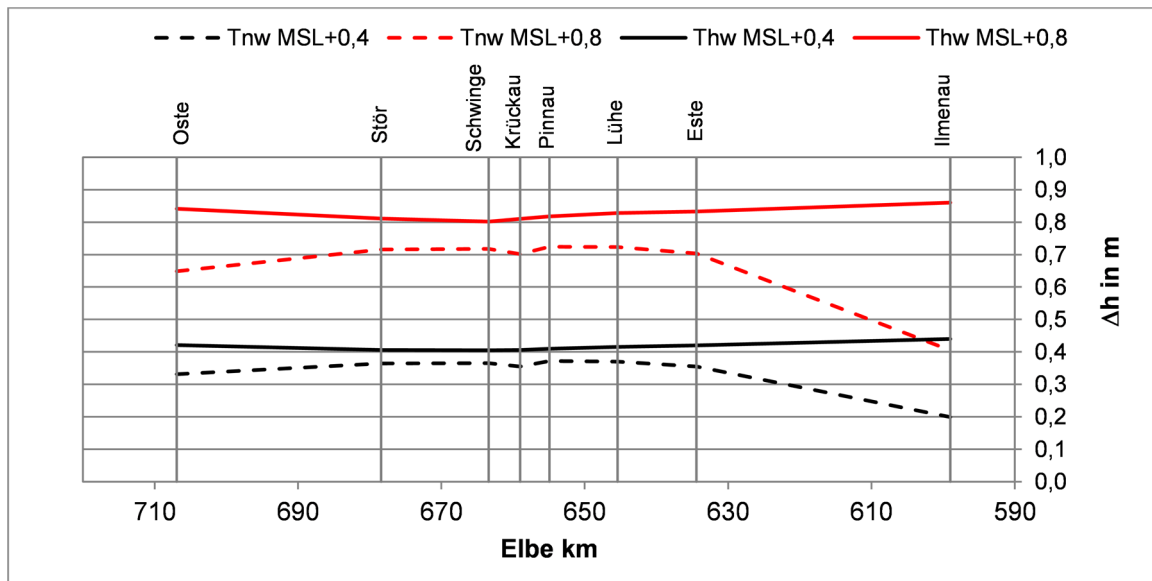
Eine weitere Projektion für die Nordsee, die allerdings auf der Annahme eines high-end Szenarios basiert, kommt von (Katsman et al. 2011). Daraus geht ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels an der niederländischen Küste bis 2100 von 0,4 bis 1,05 m hervor. Damit wird die Obergrenze von (Vellinga et al. 2009), die ebenfalls für die niederländische Küste einen Anstieg von maximal 1,15 m bis zum Ende des 21. Jh. angeben, in etwa bestätigt. Die Projektion extremer Wasserstände ist mit ungleich höheren Unsicherheiten behaftet als die Projektion mittlerer Wasserstände. Der Grund liegt darin, dass Extremwasserstände einerseits vom mittleren Meeresspiegel und andererseits von weiteren Faktoren, wie z.B. der Entwicklung des Windes und der Druckverhältnisse in der Atmosphäre, abhängen (Christensen et al. 2007a). Indessen geben (Lowe, J. A. et al. 2010) an, dass der Anstieg der Extremwasserstände im 20. Jahrhundert im Wesentlichen durch den Anstieg der MSL geprägt war und weniger durch veränderte Extremereignisse. Dies wird sich laut den Autoren auch im 21. Jahrhundert fortsetzen (ebd.).

Für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird von einem Anstieg des MSL sowie der Extremwasserstände um bis zu 0,8 m ausgegangen. Dies entspricht u.a. dem Wert, den (Weisse et al. 2014) für die Nordsee zum Ende des 21. Jahrhunderts angeben.

#### **5.1.4 Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf das Elbe-Ästuar**

Die Auswirkungen eines veränderten MSL in der Nordsee auf die mittleren Wasserstände im Elbe-Ästuar wurden von (Holzwarth et al. 2011) untersucht. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass sich ein Anstieg des MSL in der Nordsee um 0,8 m nicht unverändert in das Ästuar hinein fortsetzt. In Richtung stromauf betrachtet steigt das Thw schneller an als das Tnw, wodurch der Tidehub zunimmt (ebd.).

Abbildung 121 zeigt die Entwicklung der Tidekennwerte innerhalb des Ästuars für zwei unterschiedliche Szenarien zum Meeresspiegelanstieg. Für den Abschnitt, in dem u.a. die Este und die Krückau münden, gilt, dass der Anstieg des Thw ungefähr dem angenommenen Anstieg des MSL in der Nordsee entspricht. Der Anstieg des Tnw fällt hingegen niedriger aus. Je nach Szenario reduziert sich der Anstieg im Verlauf der Elbe zwischen Mündung und Hamburger Hafen (km 130) zusätzlich um rund 0,05 m (MSL + 0,4 m) bis 0,10 m (MSL + 0,8 m). Durch die ungleiche Änderung der Scheitelwasserstände kommt es zu einer Veränderung (Anstieg) des Tidehubs.



**Abbildung 121: Differenz des mittleren Tidehochwassers (durchgezogen) und Tideniedrigwassers (gestrichelt) zwischen Ist-Zustand und MSL-Szenario entlang der Fahrrinne der Unterelbe, QOW = 350 m<sup>3</sup>/s (in Anlehnung an (Seiffert et al. 2014))**

Die Auswirkungen eines veränderten MSL und eines veränderten Oberwasserzuflusses auf extreme Wasserstände wurden von (Schulte-Rentrop und Rudolph 2011; Seiffert et al. 2014) untersucht. Abbildung 122 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen am Beispiel der Sturmflutcharakteristik vom Februar 1976. Der in Richtung Nordsee abnehmende Einfluss des Oberwasserzuflusses ist deutlich erkennbar. Zwischen Bleckede und Zollenspieker führt ein sehr hoher Abfluss von 4000 m<sup>3</sup>/s gegenüber einem Abfluss von 500 m<sup>3</sup>/s zu einer Anhebung der Scheitelwasserstände um einen oder mehrere Dezimeter. Ab Zollenspieker beträgt der Einfluss nur noch wenige Zentimeter. Für die betrachteten Nebenflüsse, die in den Abschnitt zwischen km 599,0 und km 712,5 münden, bedeutet dies, dass der Einfluss eines möglicherweise durch den Klimawandel ansteigenden Oberwasserzuflusses im Rahmen der Betrachtung extremer Wasserstände vernachlässigt werden kann.

Der Anstieg des Meeresspiegels in der Nordsee ist hingegen ein maßgebender Faktor. Entsprechend der Erkenntnisse zu den Veränderungen des mittleren Thw entspricht der Anstieg des Sturmflutscheitelwasserstands in etwa dem Wert des angenommenen Anstiegs des MSL in der Nordsee.

Einschränkend zu beachten ist, dass die Ergebnisse auf der Grundlage der derzeitigen Topographie der Elbe gewonnen wurden. Die sehr wahrscheinlich mit dem Anstieg der MSL einhergehenden morphologischen Änderungen oder mögliche anthropogene Einflüsse sind darin nicht berücksichtigt.

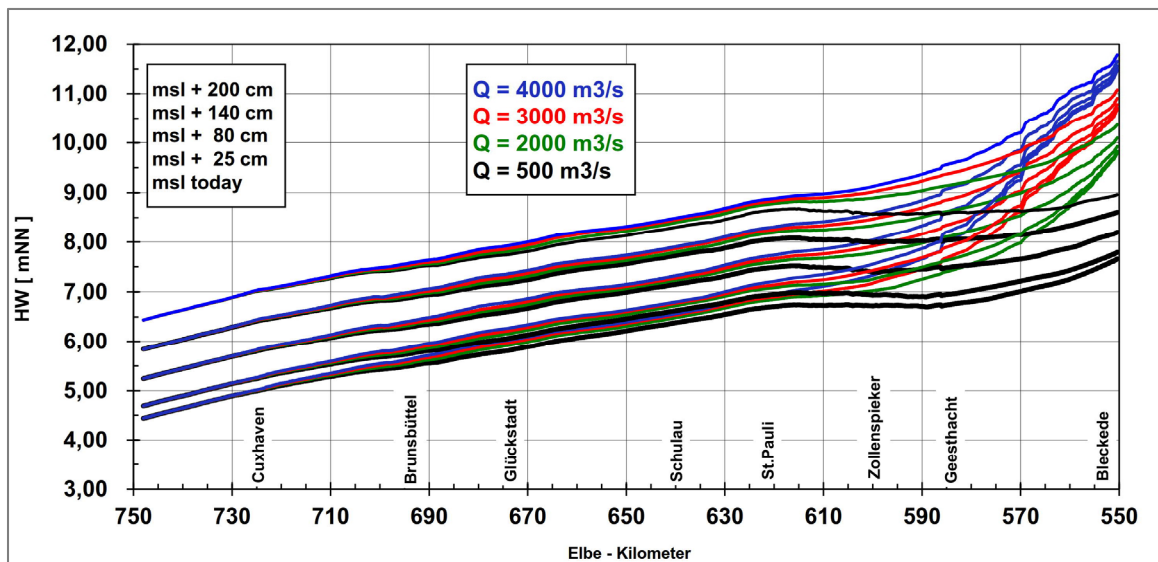


Abbildung 122: Einfluss des Meeresspiegelanstiegs und Binnenzufusses auf Sturmflutwasserstände der Sturmflutcharakteristik SF76 entlang des Elbe-Ästuars (Schulte-Rentrop und Rudolph 2011)

Die Erkenntnisse bezüglich der Veränderung mittlerer und extremer Wasserstände bilden die Grundlage für die weiteren Untersuchungen des Einflusses des Anstiegs der MSL in der Nordsee auf die Nebenflüsse der Unterelbe.

## 5.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Nebenflüsse

Im Folgenden werden am Beispiel von Este und Krückau drei relevante Aspekte betrachtet:

- i) Auswirkungen veränderter Klimaparameter auf den Binnenabfluss,
- ii) Auswirkungen eines veränderten Binnenabflusses und eines veränderten Meeresspiegels auf die statistische Einordnung seltener Schließereignisse,
- iii) Auswirkungen eines veränderten Meeresspiegels auf die Morphodynamik in den tidebeeinflussten Unterläufen.

### 5.2.1 Binnenabfluss

Aus dem betrachteten REMO A1B – Ensemble gehen einige robuste Änderungssignale hervor, wie u.a. eine leichte Zunahme der Niederschläge insgesamt und eine Umverteilung der Niederschläge innerhalb des Jahres (Abschnitt 5.1.2). Es ist zu erwarten, dass sich daraus Änderungen im mittleren Jahresgang sowie in der Häufigkeit bestimmter Abflussklassen ergeben. Allerdings ist bei den Überlegungen auch zu berücksichtigen, dass sich neben dem Niederschlag auch weitere Klimaparameter, wie z.B. die Temperatur, ändern. Eine höhere Temperatur wirkt sich positiv auf die Evapotranspiration aus. Dadurch verringert sich der Anteil des Niederschlagswassers, das zum Abfluss zur Verfügung steht.

Ein weiteres robustes Änderungssignal, das aus dem betrachteten Ensemble hervorgeht, ist die Zunahme der Starkregentage. Dies lässt erwarten, dass es häufiger zu Hochwassern kommt und die Hochwasserabflüsse möglicherweise auch steigen. Für kleine Einzugsgebiete ist es charakteristisch,

dass diese bereits bei geringen Änderungen der Niederschlagsintensitäten sehr sensitiv reagieren. Um die konkreten Auswirkungen zu bestimmen, werden Simulationen mit den erstellten N-A-Modellen für die Einzugsgebiete von Este und Krückau durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden nachfolgend dargestellt. Dazu werden jeweils beispielhaft Auswertungen für einen Standort im unteren Bereich der Einzugsgebiete beschrieben. Um die Simulationsergebnisse mit Beobachtungsdaten vergleichen zu können, werden die beiden Pegel Emmen/Este und A23/Krückau als Standort gewählt, an denen die Auswertungen vorgenommen werden.

Das Änderungssignal wird dabei stets nach demselben Muster bestimmt. Die Zeitreihe der simulierten Abflüsse (1950-2100) wird in drei gleich große Zeitscheiben (1951-2000, 2001-2050, 2051-2100) zerlegt. Diese werden separat nach den gleichen Verfahren (Mittelwertbildung, Extremwertstatistik) ausgewertet. Anschließend werden die Ergebnisse miteinander verglichen und die relativen Änderungen bestimmt. Im Folgenden werden schwerpunktmäßig die Ergebnisse für das Änderungssignal zwischen den Zeiträumen 1950-2000 und 2051-2100 dargestellt.

### 5.2.1.1 Mittlere Abflüsse

In diesem Abschnitt werden über definierte Zeiträume (Monate, Jahreszeit, Jahr) gemittelte Abflüsse sowie deren simulierte Änderungen dargestellt. Zunächst werden die Mittelwerte des Abflusses für die Jahreszeiten sowie das gesamte Jahr betrachtet. Die Ergebnisse für die beiden Pegel Emmen und A23 sind in Abbildung 123 und Abbildung 124 dargestellt.

Für den Pegel Emmen wird der Ist-Zustand (schwarze Säule) vergleichsweise gut durch den Ensemble-Mittelwert des Referenzzeitraumes (1951-2000) (rote Säule) wiedergegeben. Dies gilt insbesondere für den Frühling und den Jahreswert. Die Abflüsse im Winter und im Herbst werden leicht unterschätzt, der Abfluss im Sommer wird überschätzt. Auf die Änderungen zwischen den Zeitscheiben wird zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen.

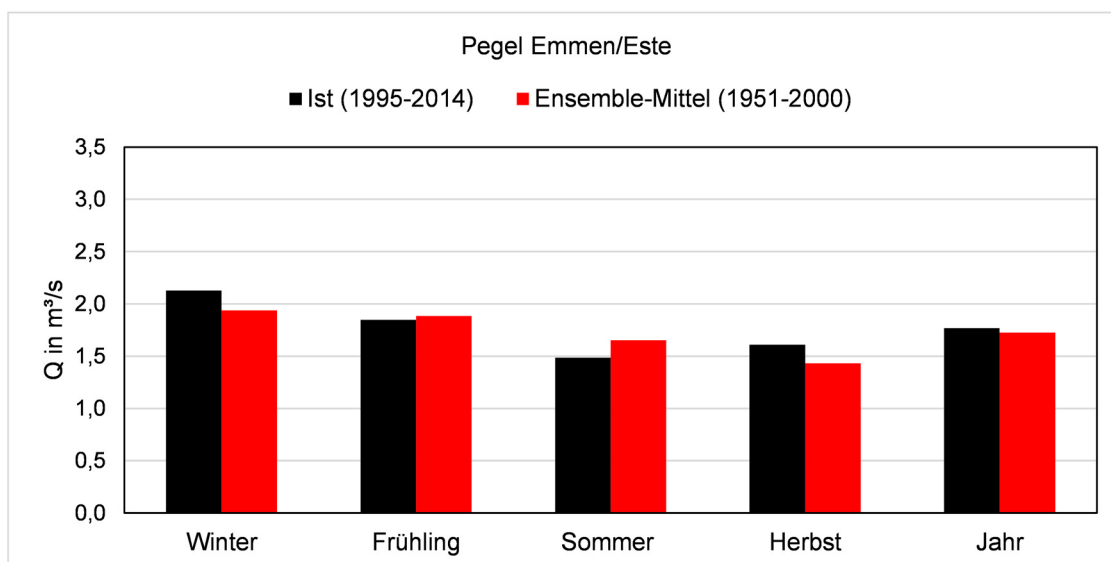
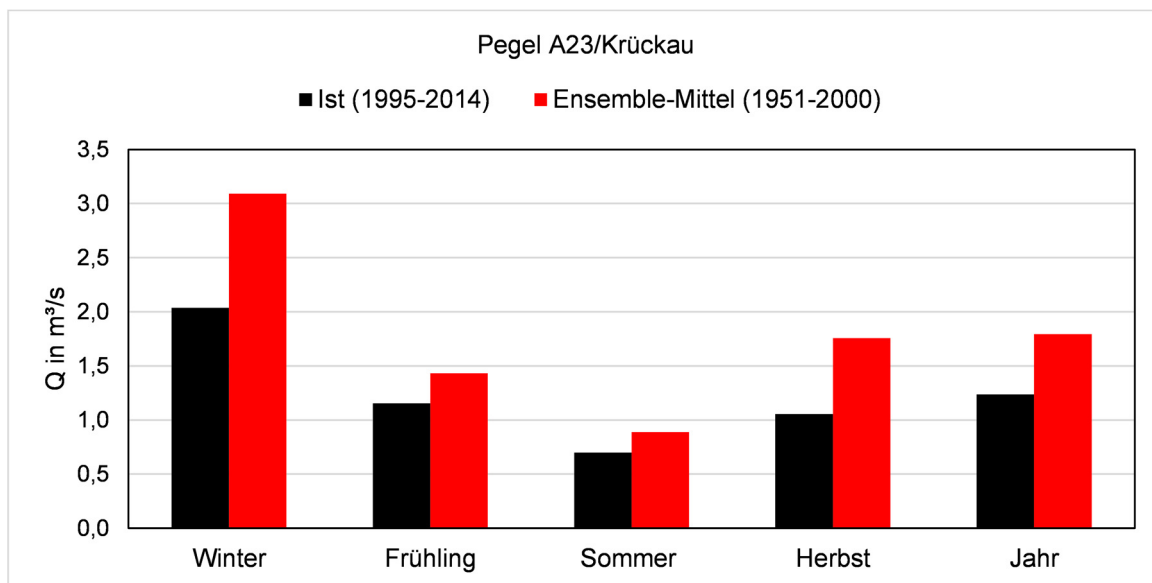


Abbildung 123: Saisonale Mittelwerte von gemessenen und simulierten Abflüssen am Pegel Emmen/Este

Für den Pegel A23 wird der Ist-Zustand (schwarze Säule) durch den Ensemble-Mittelwert deutlich überschätzt. Dies gilt vor allem für den Winter, den Herbst und das gesamte Jahr. Für den Frühling und den Sommer ist die Abweichung weniger stark.

Bei der Beurteilung der Gegenüberstellung ist zu beachten, dass ein direkter Vergleich nur mit Einschränkungen möglich ist. Zum einen werden hier Messwerte (Ist-Zustand) mit Modellergebnissen verglichen. Zum anderen weichen die Zeiträume, für welche die Daten miteinander verglichen werden, voneinander ab ((Ist-Zustand 1995 – 2014)  $\leftrightarrow$  (1951-2000)).

Allein hierdurch lassen sich die großen Abweichungen jedoch nicht erklären. Die Zeitspanne der Messwerte umfasst immerhin 20 Jahre und ist damit noch vergleichsweise lang. Außerdem wurde durch die Kalibrierung der N-A-Modelle (Abschnitt 2.3.1) sichergestellt, dass die realen hydrologischen Verhältnisse in den Einzugsgebieten gut abgebildet werden. Dementsprechend sind die Abweichungen größtenteils auf die Klimamodellergebnisse zurückzuführen.



**Abbildung 124: Saisonale Mittelwerte von gemessenen und simulierten Abflüssen am Pegel A23/Krückau**

Unabhängig von den Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten können die Auswirkungen veränderter Klimaparameter auf den Abfluss bestimmt werden, indem nur die relativen Änderungssignale betrachtet werden. In Abbildung 125 sind die relativen Änderungssignale des Abflusses und des Niederschlags dargestellt.

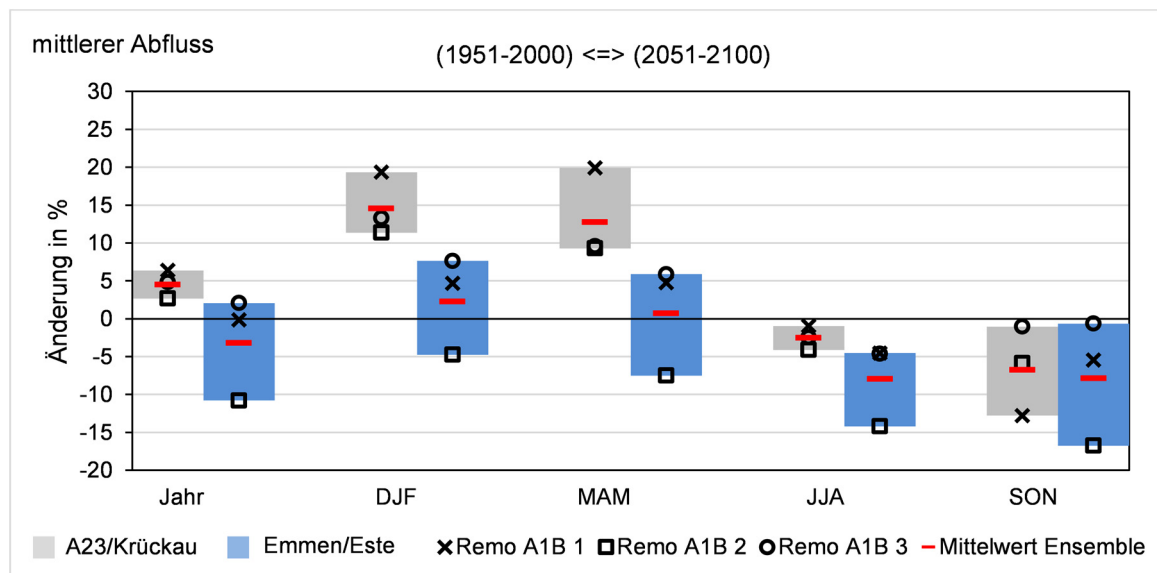
Es fällt zunächst auf, dass der mittlere Jahresabfluss der Krückau leicht zunimmt (5,0%), wohingegen der mittlere Jahresabfluss der Este leicht abnimmt (-2,5%). Die Zunahme des mittleren Jahresabflusses der Krückau ist vor allem auf deutlich höhere Abflüsse im Winter und Frühling zurückzuführen, die nur teilweise durch die leichten Abnahmen im Sommer und im Herbst kompensiert werden. Die leichte Abnahme des mittleren Jahresabflusses der Este ist vor allem auf den deutlichen Rückgang der Abflüsse im Sommer und Herbst zurückzuführen, die nicht durch die leichten Zunahmen der Abflüsse im Winter und Frühling kompensiert werden.

Hinsichtlich der Eindeutigkeit der Änderungssignale fällt auf, dass die Änderungssignale an der Krückau für alle Jahreszeiten sowie für das gesamte Jahr robust sind. An der Este gilt dies nur für den

Sommer und den Herbst. Bezüglich der Bandbreiten fällt auf, dass die Bandbreiten des Abflusses in der Krückau durchweg geringer ausfallen als in der Este.

Beim Vergleich der Änderungssignale der Abflüsse mit den Änderungssignalen der Niederschläge (Abbildung 118) fällt Folgendes auf:

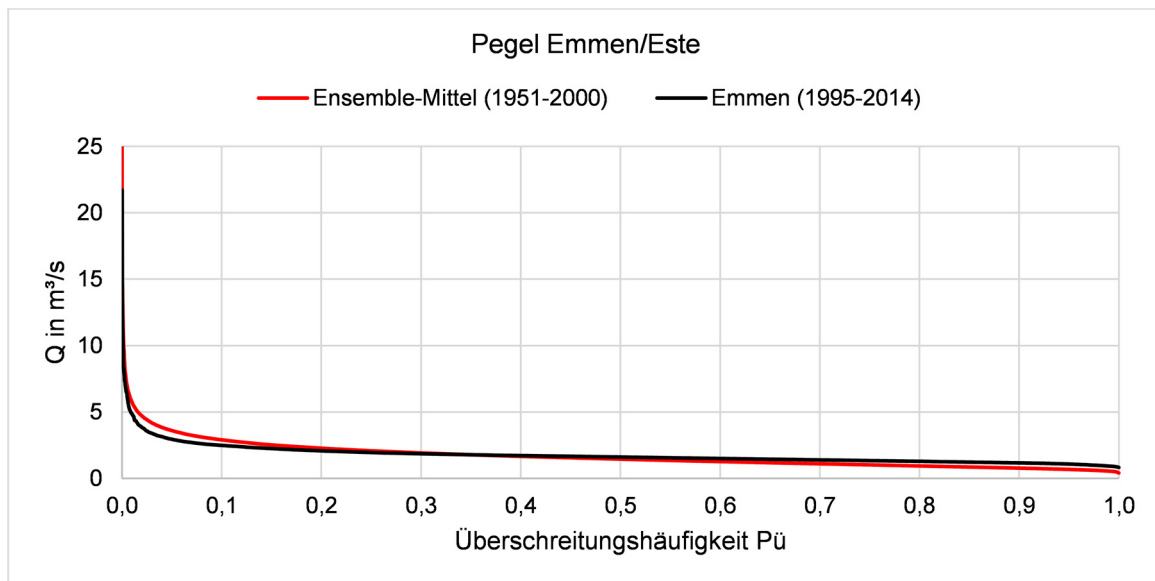
- i) Ein robustes Änderungssignal der Niederschlagssumme führt in allen Fällen zu einem robusten Änderungssignal des Abflusses. Für die Este gilt dies nur für den Sommer und den Herbst.
- ii) Im Herbst ist das Änderungssignal des Abflusses für beide Flüsse deutlich kleiner als das Änderungssignal des Niederschlags. Im Fall der Krückau weisen die Änderungssignale sogar eine gegensätzliche Tendenz auf.
- iii) Die Bandbreiten des Abflusses sind fast immer größer als die Bandbreiten des Niederschlags. Die einzige Ausnahme bildet der Winter. Hier sind die Bandbreiten in etwa gleich groß.



**Abbildung 125: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Abflussänderungen an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau für den Zeitraum 2051 - 2100 gegenüber 1951 - 2000 sowie Werte der einzelnen Simulationen**

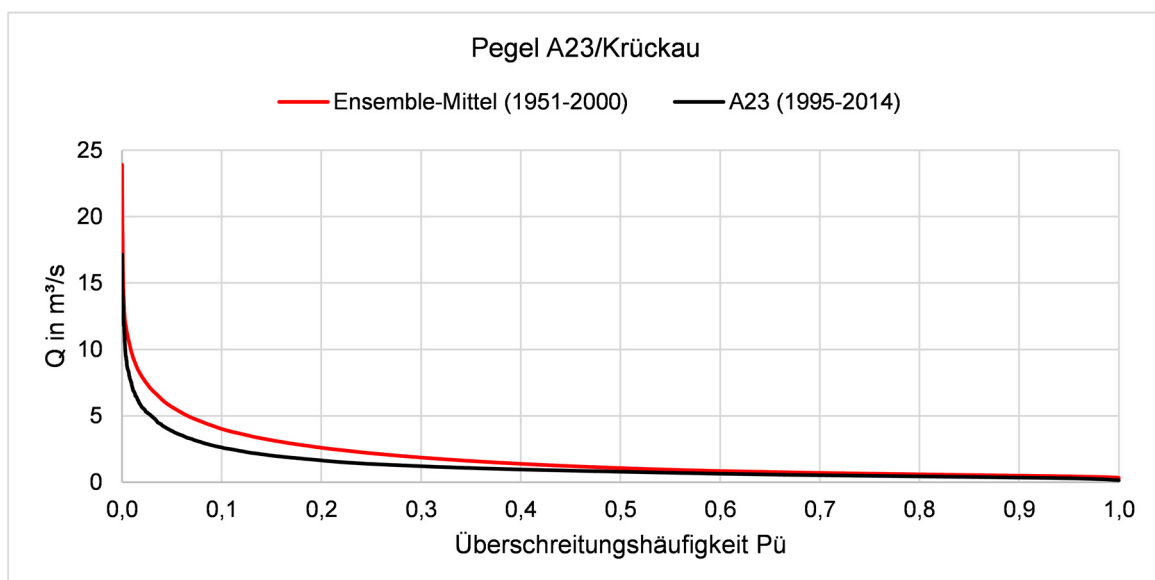
### 5.2.1.2 Abflussspektrum

In diesem Abschnitt werden Häufigkeiten definierter Abflüsse sowie deren Änderungen anhand der Dauerlinien untersucht. Zunächst werden die simulierten Abflüsse mit den an den Pegeln gemessenen Abflüssen in Form von Dauerlinien verglichen (Abbildung 126 und Abbildung 127). Für den Pegel Emmen wird der Ist-Zustand (schwarze Linie) vergleichsweise gut durch den Ensemble-Mittelwert des Referenzzeitraumes (1951-2000) (rote Linie) wiedergegeben. Dies gilt insbesondere für den Bereich der mittleren Abflüsse ( $0,2 < P_u < 0,5$ ). Die niedrigen Abflüsse werden durch die Modellergebnisse unterschätzt. Die hohen Abflüsse werden überschätzt.



**Abbildung 126: Häufigkeiten von gemessenen und simulierten Abflüssen am Pegel Emmen/Este**

Für den Pegel A23 wird der Ist-Zustand (schwarze Linie) insgesamt nicht besonders gut durch den Ensemble-Mittelwert des Referenzzeitraumes (1951-2000) (rote Linie) wiedergegeben. Im Bereich der kleinen Abflüsse ( $P_{\bar{u}} > 0,5$ ) ist die Approximation zwar noch gut. Dies ist jedoch nicht verwunderlich, da es sich hier im Wesentlichen um den Basisabfluss handelt, der von den Niederschlägen unbeeinflusst ist. Im Bereich der mittleren und höheren Abflüsse ( $P_{\bar{u}} < 0,5$ ) werden die Abflüsse durch die Simulation deutlich überschätzt. Die Anmerkungen zu möglichen Gründen der Abweichungen aus Abschnitt 5.2.1.1 gelten an dieser Stelle gleichermaßen, reichen aber wiederum nicht aus, um die großen Abweichungen plausibel zu erklären.



**Abbildung 127: Häufigkeiten von gemessenen und simulierten Abflüssen am Pegel A23/Este**

Analog zum Vorgehen in Abschnitt 5.2.1.1 werden im Folgenden die Änderungssignale näher betrachtet. Abbildung 128 stellt die simulierten Änderungen der Dauerlinien des Abflusses an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückkau für den Zeitraum (2051-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1951-2000) dar.

In den Darstellungen sind Abflüsse mit einer Überschreitungshäufigkeit von 0,01 (sehr hohe Abflüsse) ausgeblendet. Die Änderungen der extremen Hochwasserabflüsse werden im nachfolgenden Abschnitt 5.2.1.3 auf der Grundlage von zeitlich höher aufgelösten Daten (Stundenwerte statt Tageswerte) betrachtet.

Im Winter ist für beide Standorte ein Anstieg der Abflüsse für fast alle Überschreitungshäufigkeiten zu erkennen. Eine Ausnahme bilden die Abflüsse mit niedrigen (hohe Abflüsse) und sehr hohen Überschreitungshäufigkeiten (sehr niedrige Abflüsse), die nur geringfügig zunehmen bzw. am Pegel Emmen sogar leicht abnehmen. Die Zunahme der Abflüsse im Winter ist also im Wesentlichen auf den Anstieg der mittleren Abflüsse ( $0,1 < P_{\text{Ü}} < 0,8$ ) zurückzuführen. Das Änderungssignal unterscheidet sich an beiden Pegeln deutlich. Während für den Pegel A23 aus allen drei Simulationen ein robustes Signal mit einer vergleichsweise kleinen Bandbreite hervorgeht, ist für den Pegel Emmen keine eindeutige Aussage aus den drei Simulationen abzuleiten. Zwei Simulationen ergeben eine Zunahme, eine Simulation eine Abnahme der Abflüsse.

Im Sommer ist für beide Pegel eine Abnahme der Abflüsse für fast alle Überschreitungshäufigkeiten zu erkennen. Eine Ausnahme bilden die Abflüsse mit niedrigen Überschreitungshäufigkeiten (hohe Abflüsse), die am Pegel Emmen einen Anstieg und am Pegel A23 nur eine geringe Abnahme zeigen. Eine weitere Ausnahme stellen die Abflüsse mit sehr hohen Überschreitungshäufigkeiten (sehr niedrige Abflüsse) dar, die an beiden Pegeln nahezu unverändert bleiben. Die Abnahme der Abflüsse im Sommer ist also im Wesentlichen auf den Rückgang der mittleren Abflüsse ( $0,1 < P_{\text{Ü}} < 0,8$ ) zurückzuführen. Für beide Pegel geht aus allen drei Simulationen ein robustes Änderungssignal hervor.

Im gesamten Jahr werden Unterschiede zwischen den beiden Pegeln deutlich. Am Pegel Emmen zeigt sich für alle Überschreitungshäufigkeiten (mit Ausnahme der sehr hohen) eine leichte Abnahme. Die Bandbreite der projizierten Abflüsse ist sehr groß und das Änderungssignal ist nicht robust. Am Pegel A23 zeigt sich ein anderes Bild. Die Abflüsse mit einer Überschreitungshäufigkeit  $P_{\text{Ü}} < 0,5$  (mittlere bis hohe Abflüsse) nehmen zu, während die übrigen (mittlere bis niedrige Abflüsse) abnehmen. Die Bandbreite der projizierten Änderungen ist vergleichsweise gering und das Änderungssignal ist robust.

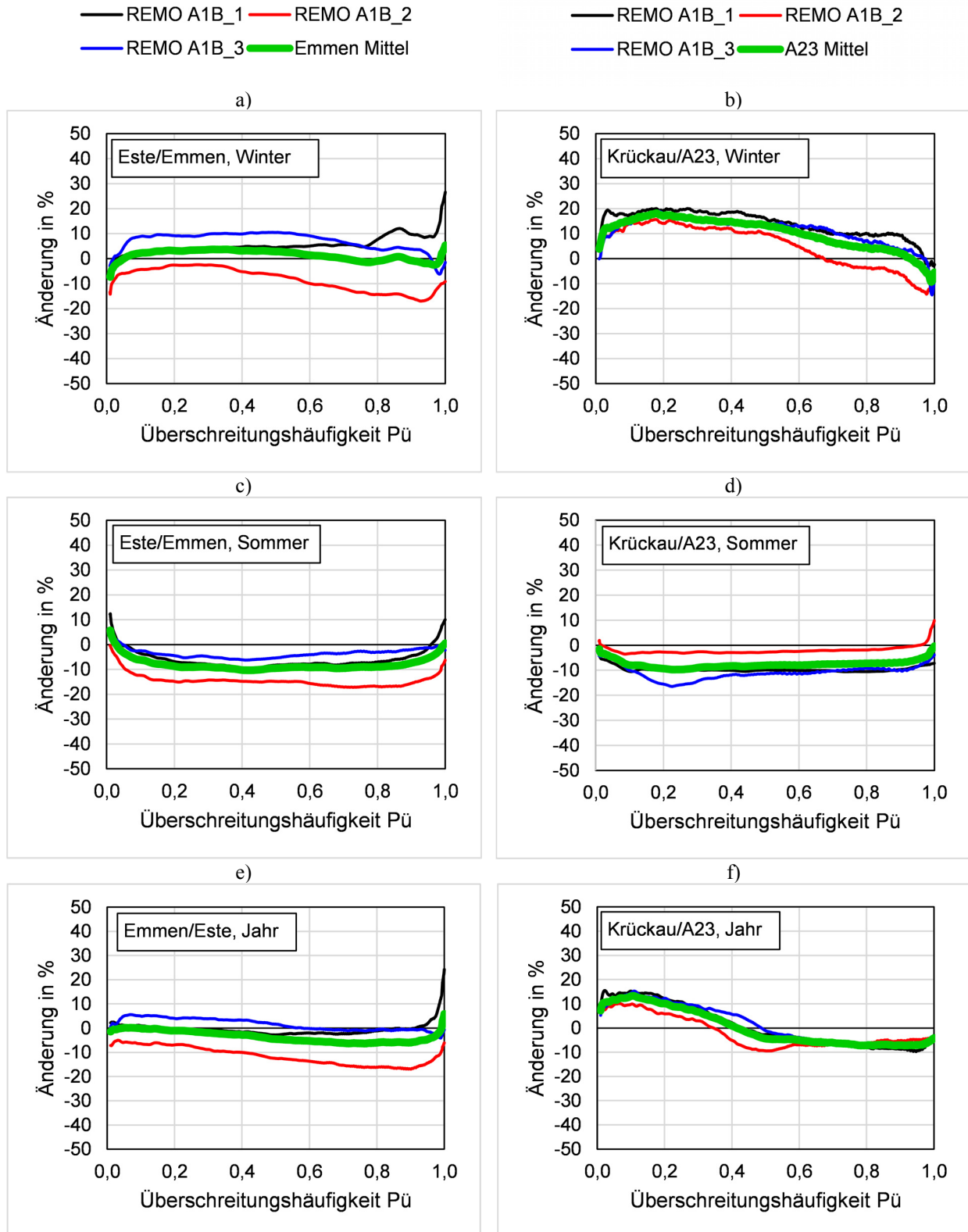


Abbildung 128: Simulierte Änderungen (2051 – 2100 gegenüber 1951 - 2000) der Dauerlinien des Abflusses an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau für den Winter (a), (b) den Sommer (c), (d) und das gesamte Jahr (e), (f)

### 5.2.1.3 Hochwasserabflüsse

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen veränderter Klimaparameter auf die Hochwasserabflüsse in der Este und der Krückau untersucht. Dazu werden statistische Abflüsse verglichen, die mit Hilfe extremwertstatistischer Verfahren bestimmt werden. Als Grundlage wurden aus den Simulationsergebnissen folgende Zeitreihen extrahiert:

- i) Maximaler Jahresabfluss
- ii) Maximaler Abfluss im Sommerhalbjahr (Mai – Oktober)
- iii) Maximaler Abfluss im Winterhalbjahr (November – April)

Eine Trenduntersuchung ergab für alle Zeitreihen keinen signifikanten Trend. Aus jeder Zeitreihe werden drei Stichproben gewonnen, die jeweils einen Zeitraum von 50 Jahren abdecken (1951-2000, 2001-2050, 2051-2100). Analog zum Vorgehen in Abschnitt 4.2.2.1 werden an die Stichproben unterschiedliche Extremwertverteilungen angepasst. Als insgesamt beste Anpassung für alle Stichproben am Pegel Emmen wurde die Allgemeine Extremwertverteilung (GEV) identifiziert. Für die Stichproben am Pegel A23 wurde die Gumbel-Verteilung als insgesamt beste Anpassung identifiziert.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit bei der Anwendung extremwertstatistischer Verfahren auf eine Stichprobe stellt der Umgang mit extrem großen Werten dar, die weitaus größer sind als die übrigen Werte der Stichprobe. Abbildung 129 zeigt die Jahresmaxima der Abflüsse am Pegel Emmen, die auf der Grundlage der Ergebnisse von REMO A1B 2 simuliert wurden. Im Vergleich mit dem derzeitigen  $HQ_{100}$  ( $Q = 23,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , Abschnitt 4.2.2.1) stechen die beiden höchsten Ereignisse ( $101 \text{ m}^3/\text{s}$  im Jahr 2042,  $62 \text{ m}^3/\text{s}$  im Jahr 1983) hervor. Diese beiden Abflüsse überragen das aktuelle  $HQ_{100}$  um ein Mehrfaches. Derartig extreme Ereignisse kommen ausschließlich in den Ergebnissen der N-A-Simulationen für die Este vor, die auf den Klimamodellergebnissen von REMO A1B 1 und REMO A1B 2 basieren. Für die Krückau treten in allen drei Szenarien keine derart extremen Werte auf.

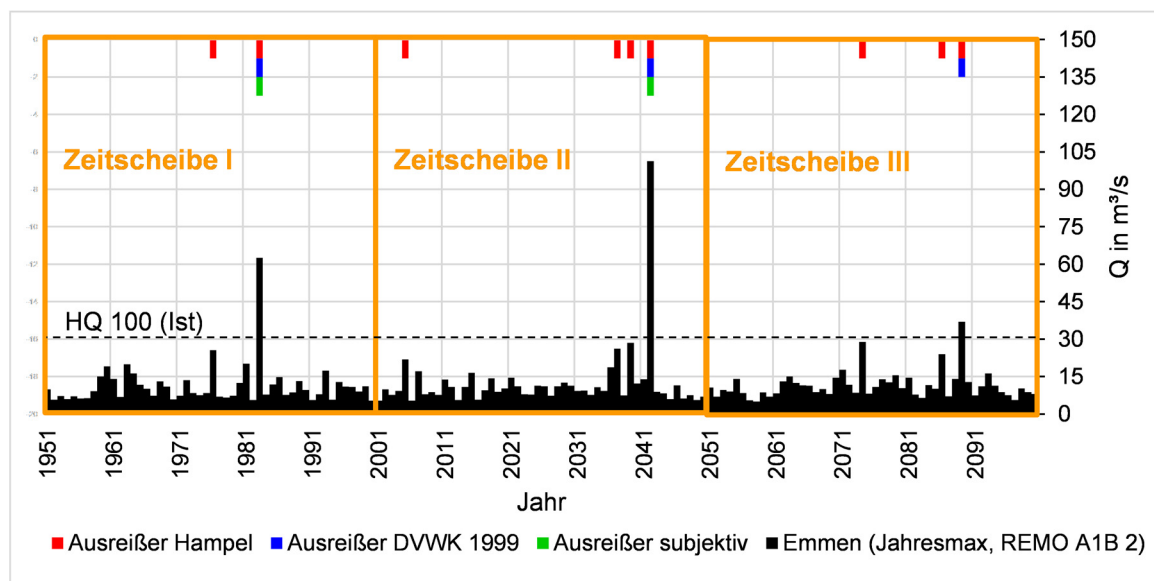
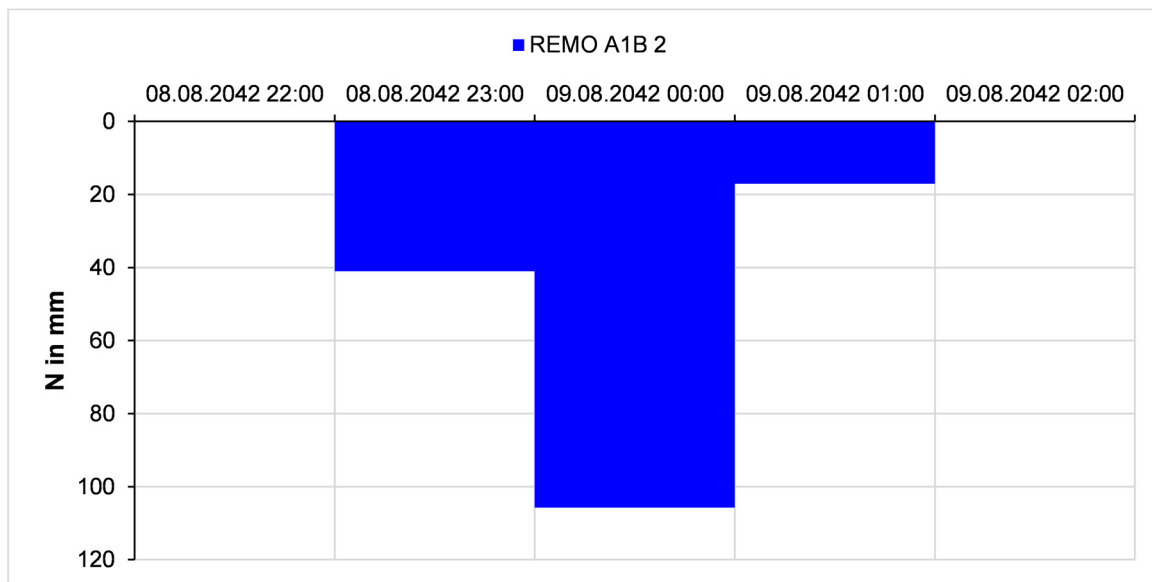


Abbildung 129: Jahresmaxima der simulierten Abflüsse am Pegel Emmen (Remo 2, 1951 – 2100)

Eine genauere Betrachtung der extremen Hochwasserereignisse in der Zeitreihe der Este ergibt, dass diese Hochwasser durch kurze, sehr intensive Regenereignisse verursacht werden. Im Jahr 2042 zeigen die Ergebnisse des Laufes REMO A1B 2 über dem Einzugsgebiet der Este ein Niederschlagsereignis mit 160 mm Niederschlag innerhalb von drei Stunden (Abbildung 130). Davon fallen über 100 mm innerhalb einer Stunde. Der Vergleich mit Beobachtungsdaten in Norddeutschland zeigt, dass die Intensität von über 100 mm/h zwar extrem hoch ist, jedoch nicht unplausibel. Beispielsweise wurden in Miltzow, Vorpommern am 15.09.1968 sogar 200 mm Niederschlag pro Stunde (Daten: DWD) gemessen.



**Abbildung 130: Simulierte Niederschlagshöhen (REMO2) im Einzugsgebiet der Este (Daten: CSC)**

Die Intensität des Niederschlagsereignisses ist somit plausibel. Der berechnete Abfluss ist allerdings so groß, dass er sich weit außerhalb des Bereiches befindet, für den die Kalibrierung des N-A-Modells durchgeführt wurde. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass zumindest die Größenordnung des Ereignisses plausibel ist. Unabhängig von der exakten Größe fällt ein Abflussereignis dieser Größenordnung innerhalb einer Zeitspanne von 50 Jahren aus dem Rahmen. Die Jährlichkeit ist sicherlich deutlich höher einzuordnen als 50 Jahre. In der Fachliteratur und den gängigen Regelwerken zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten werden derart hohe Werte als Ausreißer bezeichnet. Eine Definition von Ausreißern stammt beispielsweise von (Barnett et al. 1978). Die Autoren bezeichnen Beobachtungen, die mit dem Rest der Werte unvereinbar erscheinen, als Ausreißer. Nach (Rönz et al. 1994) können diese entweder durch Mess-, Übertragungs-, Berichts- oder Rechenfehler verursacht werden oder einer anderen Grundgesamtheit als die angenommene Verteilung angehören.

Hinsichtlich des Umgangs mit Ausreißern sind die Empfehlungen in gängigen Regelwerken und in der Fachliteratur gegensätzlich. Das Merkblatt (DVWK 1999) und (Dyck 1980) empfehlen die Durchführung von Ausreißertests und im Fall eines positiven Tests die Entfernung der identifizierten Werte aus den Stichproben. Indessen empfiehlt das neuere Merkblatt (DWA 2012) diese vermeintlichen Ausreißer nicht zu entfernen. Stattdessen soll die statistische Einordnung dieser Ereignisse auf der Grundlage weiterer hydrologischer Informationen (z.B. Abgleich mit Nachbarpegeln) erfolgen.

Die gegensätzlichen Empfehlungen erübrigen die Klärung der Frage, ob diese Empfehlungen für die vorliegenden Stichproben überhaupt Gültigkeit besitzen. Schließlich handelt es sich bei den vorliegenden Zeitreihen nicht um Beobachtungsdaten im eigentlichen Sinne, sondern um Modellergebnisse, die von Modellergebnissen (Klimadaten) angetrieben wurden.

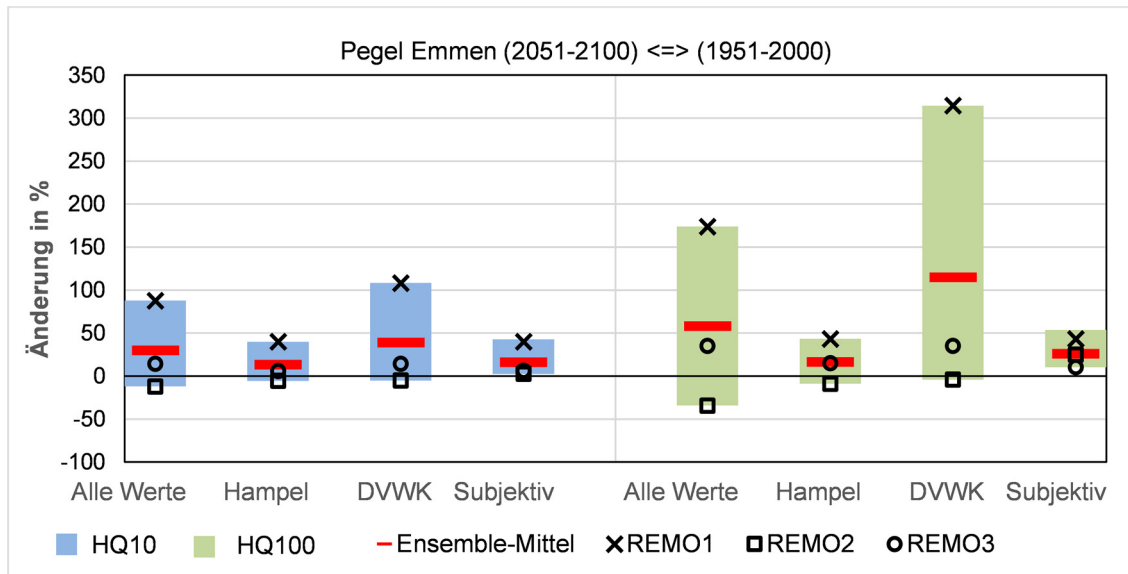
Zunächst wird untersucht, wie groß der Einfluss dieser extremen Werte auf das Änderungssignal ist. Dazu werden die Stichproben auf vier unterschiedliche Arten bereinigt (Tabelle 27) und anschließend ausgewertet. Die Ergebnisse der Ausreißertests sind in Abbildung 129 dargestellt. Es wird deutlich, dass der Test nach Hampel die meisten Ausreißer ergibt, gefolgt von dem Test nach (DVWK 1999). Die Einschätzung der Werte auf der Grundlage des bisher im Rahmen dieser Arbeit generierten Systemverständnisses ergibt, dass lediglich die beiden extrem hohen Ereignisse, bei denen der Abfluss mehr als das Zweifache des aktuellen  $HQ_{100}$  beträgt entfernt werden sollten, um plausible Aussagen zu den Jährlichkeiten treffen zu können.

**Tabelle 27: Untersuchte Varianten zum Umgang mit Ausreißern**

Variante	Verfahren
Alle Werte	Keine Bereinigung
Hampel	Bereinigung, Ausreißertest nach HAMPEL
DVWK	Bereinigung Ausreißertest nach (DVWK 1999)
Manuell	Bereinigung, Entfernung der Ereignisse mit $Q > HQ_{100}$ (Ist-Zustand)

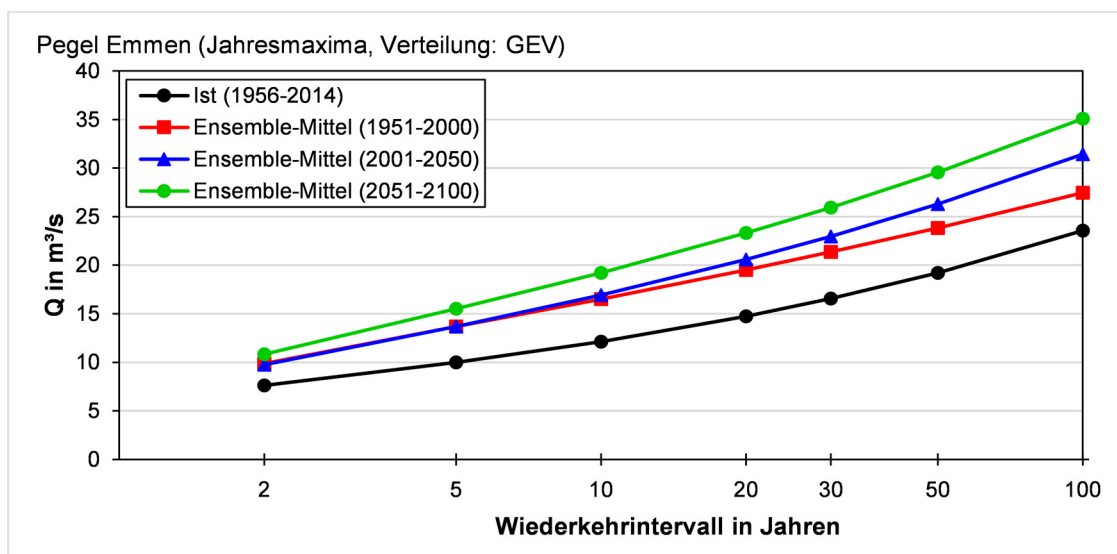
Die Auswirkungen der Varianten zum Umgang mit den vermeintlichen Ausreißern auf das Änderungssignal der Abflüsse definierter Jährlichkeiten werden in Abbildung 131 dargestellt. Es wird deutlich, dass die grundsätzliche Tendenz (Mittelwert des betrachteten Ensembles) unabhängig vom Umgang mit den vermeintlichen Ausreißern erhalten bleibt. Auch die Rangfolge der drei Ensemble-Mitglieder bleibt bei allen Varianten unverändert. Allerdings unterscheiden sich die Ergebnisse in der Ausprägung, d.h. in Größenordnung und Bandbreite, signifikant. Werden die extrem hohen Werte bei der Anpassung berücksichtigt, ist die Bandbreite der Änderungen sehr hoch. Die größten Bandbreiten treten allerdings auf, wenn die Stichproben auf der Grundlage des Ausreißertests nach (DVWK 1999) bereinigt werden. Dies zeigt, dass die Bereinigung der Stichproben um vermeintliche Ausreißer nicht in jedem Fall zu gemäßigeren Ergebnissen führt und dass Ausreißertests nicht ohne detaillierte Betrachtungen angewendet werden sollten.

Die Auswertung der beiden Stichproben, die mit Hilfe des Ausreißertests nach Hampel sowie manuell auf der Grundlage des Systemverständnisses bereinigt wurden, liefert vergleichbare Ergebnisse. Die Bandbreite ist in beiden Fällen vergleichsweise klein, der Mittelwert des Änderungssignals hat eine plausible Größenordnung. Werden lediglich die sehr extremen Werte entfernt (manuelle Bereinigung), ist die Tendenz des Änderungssignals aller Ensemble-Mitglieder gleich, womit das Signal als robust eingestuft wird. Der Test nach Hampel identifiziert sehr viele Stichprobenwerte als Ausreißer. Darunter befinden sich auch Werte, die nur geringfügig größer sind als das aktuelle  $HQ_{100}$ . Aufgrund der Größenordnung sind diese jedoch als plausibel einzustufen. Aus diesem Grund werden die Stichproben im Folgenden manuell bereinigt, bevor die Auswertungen durchgeführt werden. Eine Bereinigung ist erforderlich für die Stichproben, die aus den simulierten Abflusszeitreihen der Este (Antrieb REMO A1B 1 und REMO A1B 2) gewonnen werden. In den übrigen Zeitreihen (Este: REMO A1B 3, Krückau: Alle REMO A1B Läufe) heben sich keine Werte in einem vergleichbar extremen Umfang ab, weshalb auch keine Bereinigung erforderlich ist.



**Abbildung 131: Auswirkungen der Entfernung von Ausreißern aus den Stichproben auf die Änderungen (2051-2100  $\leftrightarrow$  1951-2000) ausgewählter statistischer Abflussereignisse am Pegel Emmen (Extremwertverteilung: GEV)**

In Abbildung 132 und Abbildung 133 sind die Ergebnisse der extremwertstatistischen Auswertungen der Jahresmaxima zusammengefasst. Für die Pegel Emmen/Este und A23/Krückau ist für jede Zeitscheibe der Mittelwert des REMO A1B – Ensembles dargestellt. Zum Vergleich sind außerdem die Werte für den Ist-Zustand (Abschnitt 4.2.2.1) dargestellt. Für beide Pegel wird deutlich, dass die Abflüsse des Ist-Zustandes von den Abflüssen des Referenzzeitraumes der Klimaberechnungen (1951-2000) überschätzt werden. Für den Pegel Emmen ist eine deutliche Überschätzung der Abflüsse aller Wiederkehrintervalle erkennbar. Für den Pegel A23 ist eine leichte Überschätzung der Abflüsse aller Wiederkehrintervalle erkennbar. Für den Pegel Emmen wird deutlich, dass vor allem die Abflussereignisse mit hohen Jährlichkeiten in Zukunft deutlich größer ausfallen werden. Für den Pegel A23 ist kaum eine Veränderung erkennbar.



**Abbildung 132: Abflüsse definierter Wiederkehrintervalle von gemessenen und simulierten Daten für den Pegel Emmen/Este**

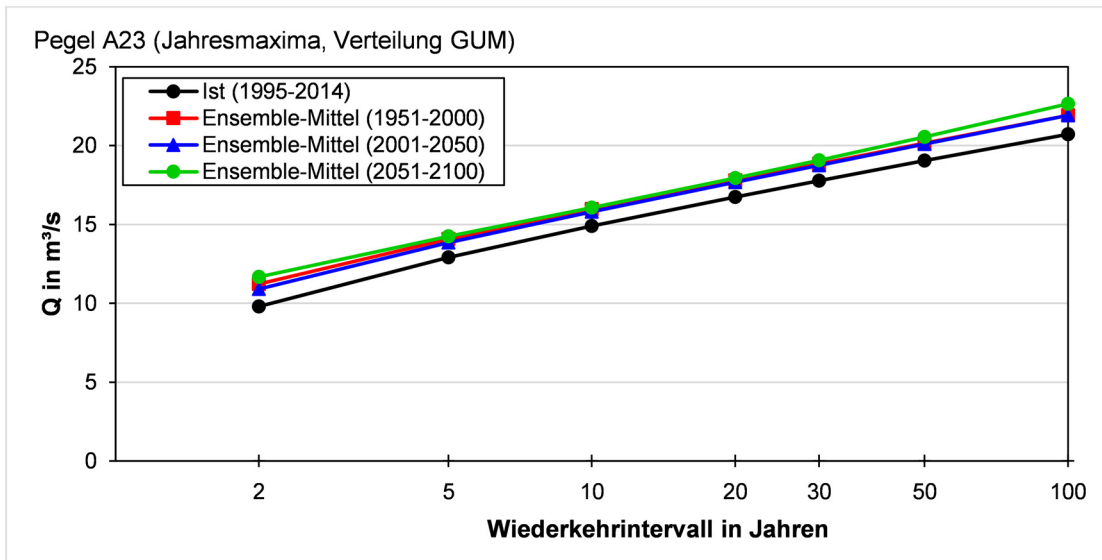


Abbildung 133: Abflüsse definierter Wiederkehrintervalle von gemessenen und simulierten Daten für den Pegel A23/Krückkau

Im Folgenden werden nun die relativen Änderungen der Abflüsse ausgewählter Wiederkehrintervalle betrachtet. Abbildung 134 und Abbildung 135 zeigen die ermittelten Änderungssignale für das HQ<sub>5</sub>, HQ<sub>10</sub> und HQ<sub>100</sub>. Grundsätzlich gilt in beiden Fällen, dass die Bandbreite mit zunehmendem Wiederkehrintervall größer wird. Außerdem steigen die Abflüsse im Sommerhalbjahr stärker an als die Abflüsse im Winterhalbjahr. Im Fall der Este zeigen sich für das Jahr und das Sommerhalbjahr robuste Änderungssignale. Für das HQ<sub>5</sub> und das HQ<sub>10</sub> liegen diese im Bereich von 0 – 35%. Für das HQ<sub>100</sub> liegt das Änderungssignal im Bereich von 30 – 45%. Für die Abflüsse im Winterhalbjahr ist die Aussage des betrachteten Ensembles indifferent. Vor allem für das HQ<sub>100</sub> ergibt sich eine sehr große Bandbreite von -10 – 85%. Im Fall der Krückkau zeigen sich insgesamt geringe Änderungen. Diese liegen für alle Ereignisse im Bereich ±10%. Die einzige Ausnahme bildet das Änderungssignal des HQ<sub>100</sub> im Sommerhalbjahr.

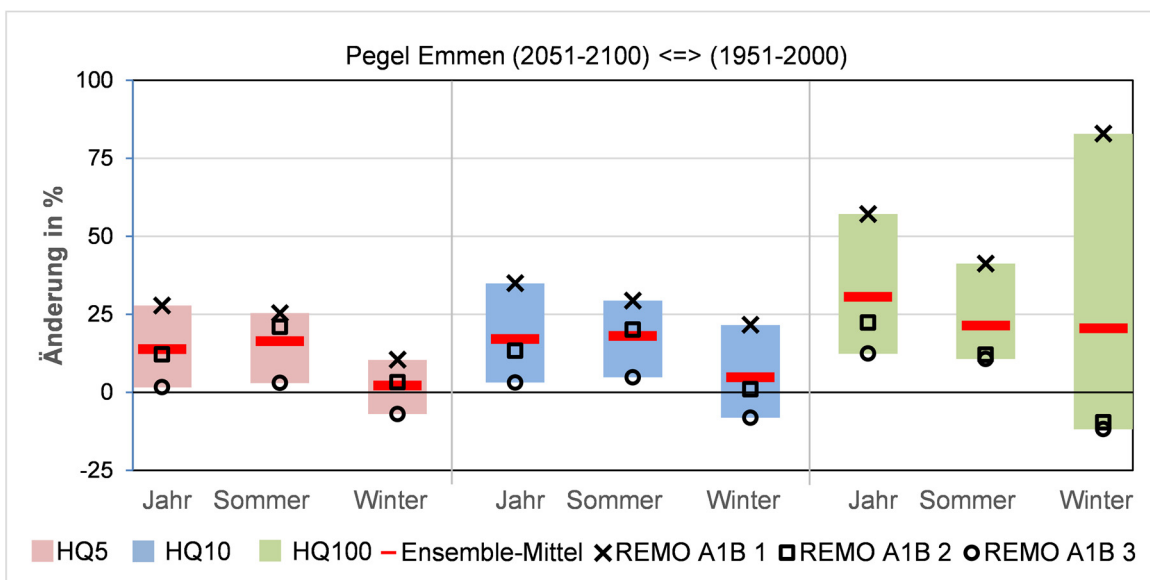
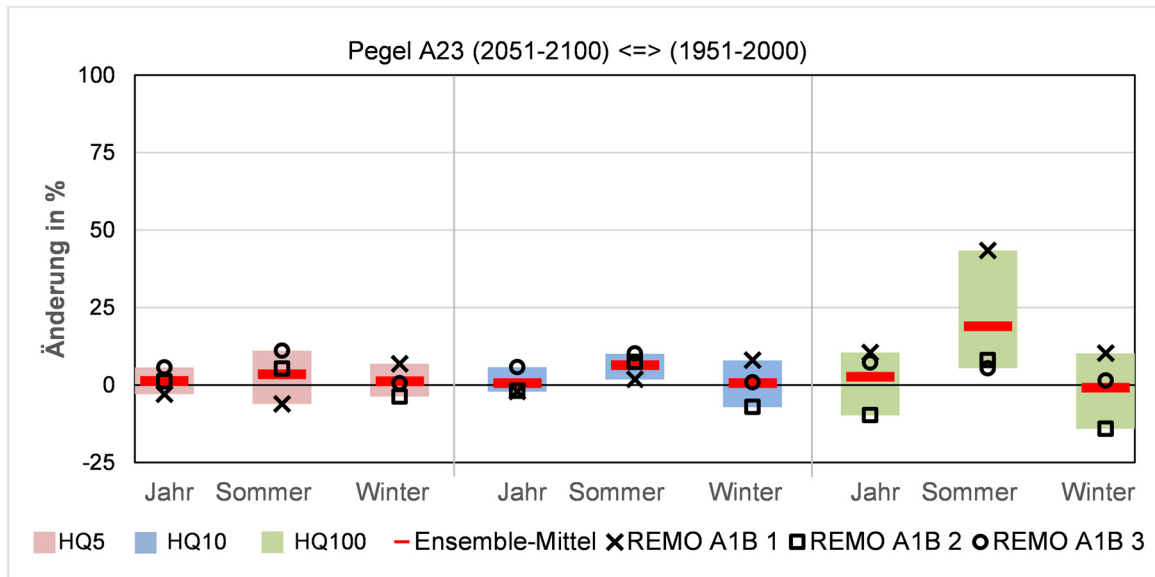


Abbildung 134: Bandbreiten der Abflussänderungen und Einzelwerte der Szenarien ausgewählter Wiederkehrintervalle für den Pegel Emmen/Este



**Abbildung 135: Bandbreiten der Abflussänderungen und Einzelwerte der Szenarien ausgewählter Wiederkehrintervalle für den Pegel A23/Krückau**

### 5.2.2 Wiederkehrintervall seltener Schließereignisse

Das Wiederkehrintervall der beiden in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Lastfälle A (HQ<sub>5</sub>, ein gesperrtes Tnw) und B (HQ<sub>5</sub>, zwei gesperrte Tnw) wird zum einen durch einen steigenden Meeresspiegel und zum anderen durch einen höheren Binnenabfluss beeinflusst.

Ein höherer Binnenabfluss führt bei einer Sperrung zu einem beschleunigten Anstieg des Wasserstandes. Ein höherer Meeresspiegel führt dazu, dass die Tnw insgesamt höher ausfallen. Damit treten Tnw, die unter heutigen Verhältnissen sehr selten auftreten, zukünftig häufiger auf. Die erforderlichen Höhen, die die Tnw unter Annahme der Lastfälle A und B erreichen müssen, werden analog zu Abschnitt 4.3.1.3 mit Hilfe hydrodynamisch-numerischer Modellrechnungen bestimmt. Im Rahmen der Berechnungen wurden der eingesteuerte Abfluss am oberen Modellrand (Zufluss aus dem Einzugsgebiet), an den seitlichen Rändern (Zufluss aus Schöpfwerken) sowie der Wasserstand am unteren Modellrand variiert. Die betrachtete Spanne des Abflusses basiert auf der Grundlage der für die Este ermittelten Bandbreite des Abflusses mit einem Wiederkehrintervall von fünf Jahren HQ<sub>5</sub> (Abschnitt 5.2.1). Die betrachtete Spanne des Meeresspiegelanstiegs basiert auf der Literaturrecherche zum Meeresspiegelanstieg (Abschnitt 5.1.3).

Die ermittelten Mindesthöhen der Tnw sind in Tabelle 28 und Tabelle 29 zusammengefasst. Für den Lastfall A gilt der erste angegebene Wert. Für den Lastfall B gelten beide angegebenen Werte. Grundsätzlich fällt auf, dass die angegebenen Werte mit steigendem Meeresspiegel konstant bleiben. Das ist auf die Annahme zurückzuführen, dass der Wasserstandsgradient zu Beginn der Sperrung in allen Szenarien konstant ist. Grundsätzlich führt ein steiler Gradient bei der Sperrwerksschließung zu einem geringeren Ruhewasserspiegel nach der Schließung als ein flacher Gradient. Weiterhin fällt auf, dass die Wasserstände mit zunehmendem Abfluss steigen. Eine Ausnahme davon ist der Wasserstand nach 9,0 h in der Este (erster Wert). Dieser Wert liegt konstant auf dem Niveau des Schließwasserstandes, was daran liegt, dass das zuströmende Wasser zu diesem Zeitpunkt noch komplett in dem Stauraum hinter dem Inneren Este-Sperrwerk gespeichert wird.

**Tabelle 28: Simulierte Wasserstände am Binnenpegel des Äußeren Este-Sperrwerks, 9,0 h und 21,5 h nach Beginn der Sperrung**

Este		Abflussereignis HQ5			
Meeresspiegel	Szenario		Ist	+15%	+30%
		Einheit	m ü. NHN	m ü. NHN	m ü. NHN
	Ist	m ü. NHN	2,60/2,73	2,60/2,93	2,60/3,13
	+0,25 m	m ü. NHN	2,60/2,73	2,60/2,93	2,60/3,13
	+0,50 m	m ü. NHN	2,60/2,73	2,60/2,93	2,60/3,13
	+0,80 m	m ü. NHN	2,60/2,73	2,60/2,93	2,60/3,13

**Tabelle 29: Simulierte Wasserstände am Binnenpegel des Krückau-Sperrwerks, 9,0 h und 21,5 h nach Beginn der Sperrung**

Krückau		Abflussereignis HQ5			
Meeresspiegel	Szenario		Ist	+15%	+30%
		Einheit	m ü. NHN	m ü. NHN	m ü. NHN
	Ist	m ü. NHN	2,22/2,39	2,25/2,43	2,28/2,47
	+0,25 m	m ü. NHN	2,22/2,39	2,25/2,43	2,28/2,47
	+0,50 m	m ü. NHN	2,22/2,39	2,25/2,43	2,28/2,47
	+0,80 m	m ü. NHN	2,22/2,39	2,25/2,43	2,28/2,47

Die ermittelten Werte bzw. Wertepaare werden auf der Grundlage von Abbildung 83 und Abbildung 84 statistisch eingeordnet. Die bestimmten Wiederkehrintervalle werden mit dem Wiederkehrintervall des HQ<sub>5</sub> (also 5 Jahre) multipliziert, woraus sich schließlich die Wiederkehrintervalle für die Lastfälle A und B ergeben. Diese sind in Tabelle 30 und Tabelle 31 (Lastfall A) und in Tabelle 32 und Tabelle 33 (Lastfall B) zusammengefasst.

Insgesamt fallen zwei Aspekte auf: Zum einen nimmt das Wiederkehrintervall mit steigendem Meeresspiegel ab. Zum anderen nimmt das Wiederkehrintervall mit steigendem Abfluss zu (Ausnahme: Este, Lastfall A). Ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels um 0,8 m reduziert das Wiederkehrintervall von Lastfall A um rund 80%. Das Wiederkehrintervall von Lastfall B wird um 90% (Este) bzw. 95% (Krückau) reduziert. Dabei dürfen die absoluten Größen natürlich nicht außer Acht gelassen werden, denn auch bei einer derart starken Reduktion betragen die Wiederkehrintervalle immer noch 1610 (Este) bzw. 615 Jahre (Krückau).

**Tabelle 30: Wiederkehrintervalle des Lastfalls A (HQ5, ein gesperrtes Tnw) an der Este unter Annahme ausgewählter Szenarien zum Meeresspiegelanstieg und zum Anstieg des Binnenabflusses**

Este	Abflussereignis HQ5				
	Szenario		Ist	+15%	+30%
Meeresspiegel		Einheit	Jahre	Jahre	Jahre
	Ist	Jahre	275	275	275
	+0,25 m	Jahre	150	150	150
	+0,50 m	Jahre	85	85	85
	+0,80 m	Jahre	45	45	45

**Tabelle 31: Wiederkehrintervalle des Lastfalls A (HQ5, ein gesperrtes Tnw) an der Krückau unter Annahme ausgewählter Szenarien zum Meeresspiegelanstieg und zum Anstieg des Binnenabflusses**

Krückau	Abflussereignis HQ5				
	Szenario		Ist	+15%	+30%
Meeresspiegel		Einheit	Jahre	Jahre	Jahre
	Ist	Jahre	115	120	125
	+0,25 m	Jahre	65	70	75
	+0,50 m	Jahre	40	40	40
	+0,80 m	Jahre	20	20	20

**Tabelle 32: Wiederkehrintervalle des Lastfalls B (HQ5, zwei gesperrte Tnw in Folge) an der Este unter Annahme ausgewählter Szenarien zum Meeresspiegelanstieg und zum Anstieg des Binnenabflusses**

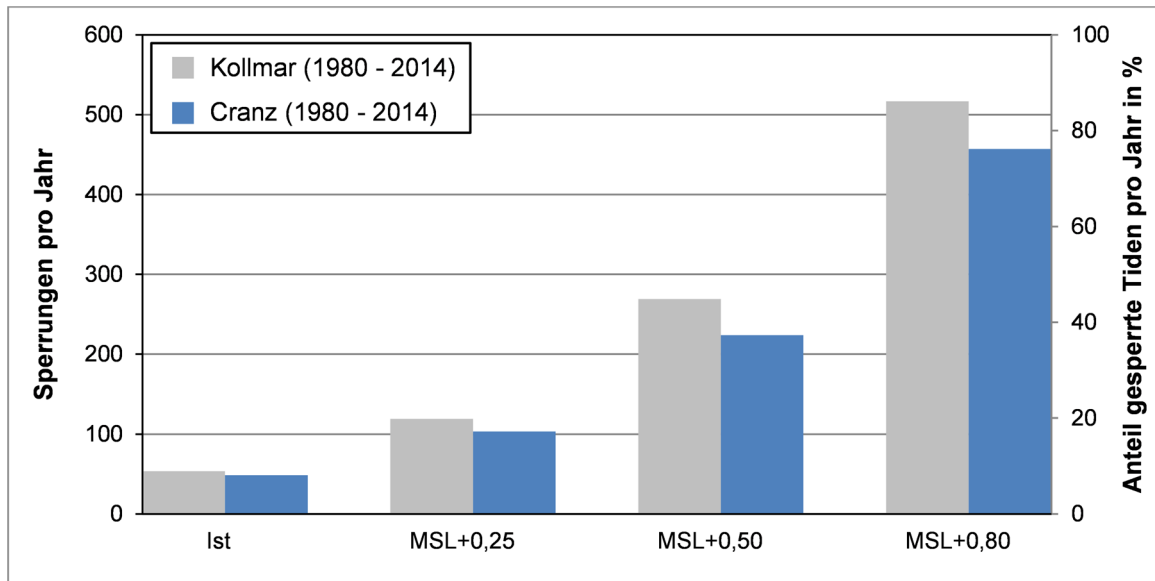
Este	Abflussereignis HQ5				
	Szenario		Ist	+15%	+30%
Meeresspiegel		Einheit	Jahre	Jahre	Jahre
	Ist	Jahre	15.490	20.980	28.230
	+0,25 m	Jahre	8.240	11.435	15.735
	+0,50 m	Jahre	4.090	5.835	8.240
	+0,80 m	Jahre	1.610	2.380	3.470

**Tabelle 33: Wiederkehrintervalle des Lastfalls B (HQ5, zwei gesperrte Tnw in Folge) an der Krückau unter Annahme ausgewählter Szenarien zum Meeresspiegelanstieg und zum Anstieg des Binnenabflusses**

Krückau	Abflussereignis HQ5				
	Szenario		Ist	+15%	+30%
Meeresspiegel		Einheit	Jahre	Jahre	Jahre
	Ist	Jahre	10.675	11.965	13.385
	+0,25 m	Jahre	4.655	5.265	5.950
	+0,50 m	Jahre	1.910	2.180	2.480
	+0,80 m	Jahre	615	705	810

### 5.2.3 Schwebstofftransport und Morphodynamik

Ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels führt zu Veränderungen der Tidedynamik, die wiederum Auswirkungen auf den Schwebstofftransport hat. Im Fall der Nebenflüsse kommt außerdem der Einfluss der Sperrwerkssteuerung hinzu. Unter Beibehaltung der derzeit gültigen Schließwasserstände ist bei einem steigenden Meeresspiegel mit deutlich mehr Schließungen zu rechnen (Abbildung 136). Ein Anstieg des MSL um 0,5 m würde beispielsweise dazu führen, dass rund die Hälfte aller Tiden (rd. 706 pro Jahr) gesperrt würden.



**Abbildung 136: Durchschnittliche Anzahl der Schließungen pro Jahr für den Ist-Zustand (1980-2014) und für angenommene Anstiege des MSL**

Im Folgenden werden drei Szenarien zum Meeresspiegelanstieg betrachtet. Dazu werden die im Rahmen der Messungen erhobenen und bei der Modellierung angesetzten Wasserstandsganglinien (vgl. Abschnitt 4.4.1) angehoben. Dies geschieht nicht durch die pauschale Addition eines Offsets, sondern auf der Grundlage der Erkenntnisse in Abschnitt 5.1.3. Die betrachtete Spanne wurde analog zu Abschnitt 5.2.2 festgelegt und basiert auf den Angaben in der Literatur zum Meeresspiegelanstieg in der Nordsee (Abschnitt 5.1.3). Die Festlegung der Werte hat folgende Hintergründe. Eine Anhebung der Wasserstandsganglinien um 0,25 m führt dazu, dass nur sehr wenige (rd. 20%) Thw der angesetzten Zeitreihe gesperrt werden, d.h. das Transportverhalten ist noch weitgehend unbeeinflusst vom Sperrwerksbetrieb. Eine Anhebung um 0,5 m führt dazu, dass rund die Hälfte der Thw in der Wasserstandszeitreihe gesperrt werden. Bei einer Anhebung um 0,8 m werden fast alle (rd. 80%) Thw gesperrt. Als Schwebstoffkonzentrationen werden in allen Fällen die gemessenen Ganglinien in unveränderter Form angesetzt.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudien sind in Abbildung 137 und Abbildung 138 dargestellt. Die wesentlichen Erkenntnisse für die Este lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- i) Im Vergleich zum Ist-Zustand bewirkt eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels um 0,25 m und um 0,5 m eine deutliche Zunahme des Sedimentimports um den Faktor drei. Das zusätzlich importierte Material wird in den unteren drei Gewässer-Kilometern (km 12,5 – km 9,5) abgelagert. Der Großteil verbleibt jedoch im Abschnitt zwischen den Sperrwerken. In Abschnitten, in denen im Referenzzustand Erosion dominiert (Estebrücke (km 5,0), Königreich (km 8,5), Inneres Este-Sperrwerk (km 11,0)), wird die Erosionstendenz verstärkt. Zwischen km 3,0 und km 0,0 treten nahezu keine Auswirkungen auf.
- ii) Im Vergleich zum Ist-Zustand bewirkt eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels um 0,8 m ebenfalls eine Zunahme des Sedimentimports. Allerdings wird in diesem Szenario weniger Material importiert als in den beiden anderen Szenarien mit geringerem MSL – Anstieg. Das zusätzlich importierte Material wird in den unteren fünf Gewässer-Kilometern (km 12,5 – km 7,5) abgelagert. Der Großteil verbleibt jedoch auch in diesem Fall im Abschnitt zwischen den Sperrwerken. In Abschnitten, die im Ist-Zustand von der

Erosion dominiert werden (Estebürge, Königreich, Inneres Este-Sperrwerk) sowie zwischen km 7,5 und km 0,0 treten nahezu keine Auswirkungen auf.

Die wesentlichen Erkenntnisse für die Krückau lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- iii) Im Vergleich zum Ist-Zustand bewirkt eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels um 0,25 m und um 0,5 m eine deutliche Zunahme des Sedimentimports (MSL+0,25m: Faktor zwei, MSL+0,5m: Faktor drei). Eine Anhebung um 0,8 m bewirkt eine extreme Zunahme des Sedimentimports (Faktor elf). Das zusätzlich importierte Material wird in allen Fällen schwerpunktmäßig bei km 10,5, km 9,5, km 8,5 und im Elmshorner Hafen (km 1,0 – km 0,0) abgelagert. Abschnitte, die im Ist-Zustand von der Erosion dominiert werden (km 8,0 – km 2,0), erodieren stärker. Im Bereich um km 10,0 kehrt sich die Verlandungstendenz in eine Erosionstendenz um.

Für beide Gewässer gilt:

- i) Die Reaktion auf eine Anhebung des MSL um 0,25 m und um 0,5 m fällt vergleichbar aus.
- ii) Die Reaktion auf eine Anhebung des MSL um 0,8 m unterscheidet sich von den beiden anderen Szenarien.
- iii) Das zusätzlich importierte Material wird vor allem in den unteren drei Gewässer-Kilometern abgelagert (Ausnahme: Elmshorner Hafen).
- iv) Abschnitte, die im Ist-Zustand von der Erosion dominiert werden, erodieren in den MSL – Szenarien tendenziell stärker.

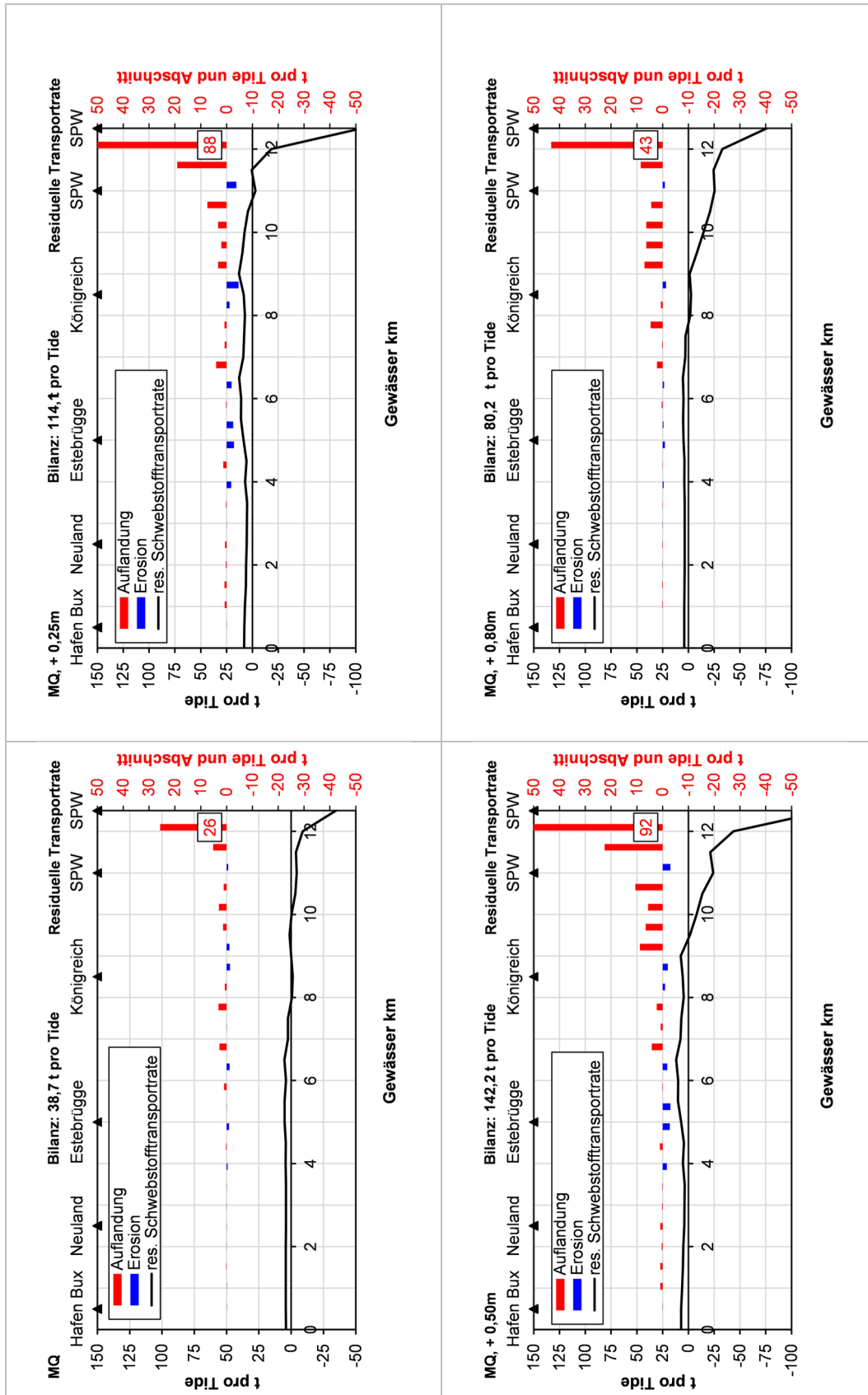


Abbildung 137: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation des mittleren Meeresspiegels (MSL) am unteren Modellrand (Simulationszeitraum 17.07.2014 - 31.07.2014)

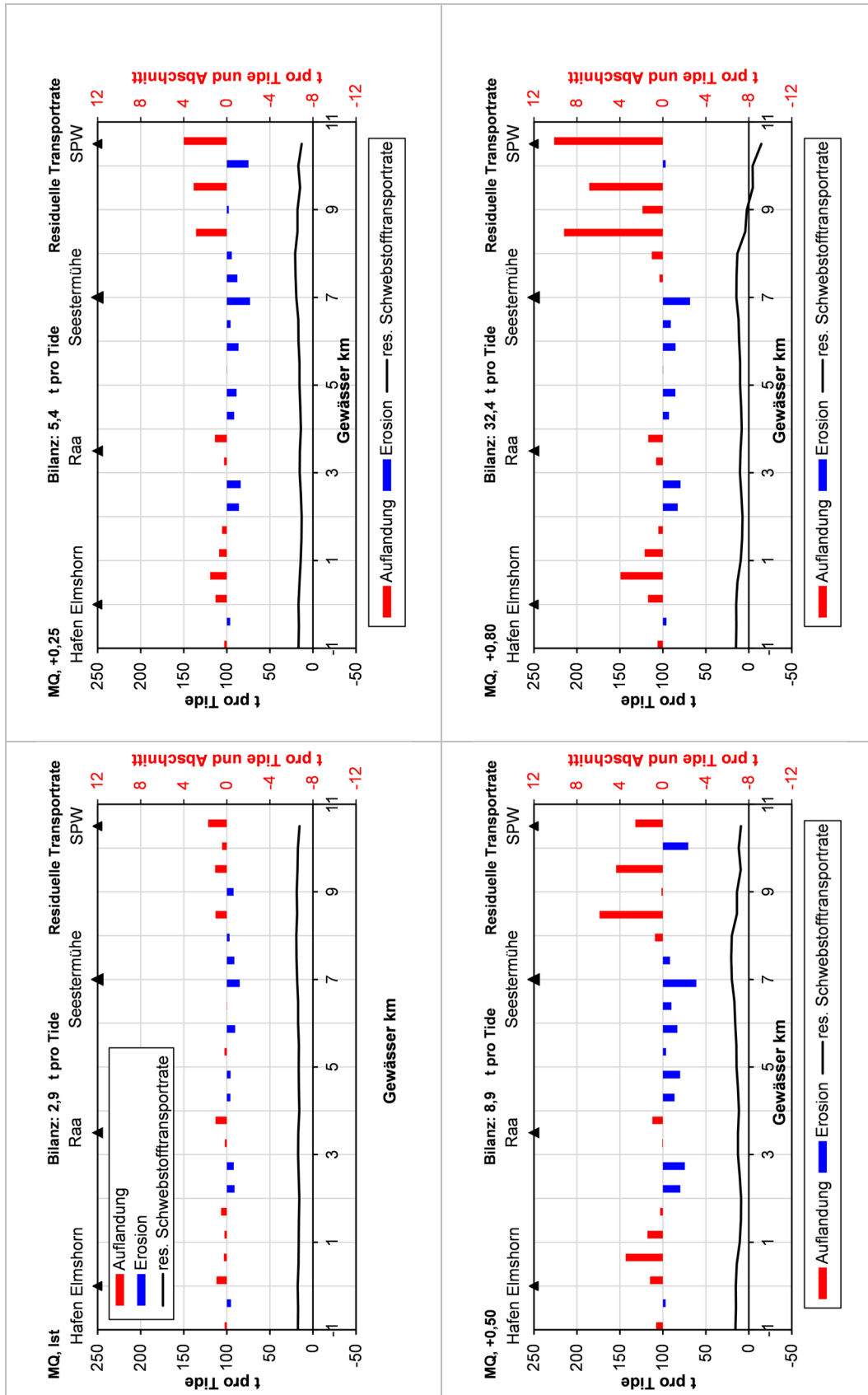


Abbildung 138: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation des mittleren Meeresspiegels (MSL) am unteren Modellrand (Simulationszeitraum 17.07.2014 - 31.07.2014)

### 5.3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Die Nebenflüsse der Unterelbe werden sowohl durch den Klimawandel als auch durch dessen Folge, den Meeresspiegelanstieg, betroffen sein. Der Binnenabfluss wird maßgeblich von den Niederschlägen über den Einzugsgebieten geprägt. Die Wasserstände im tidebeeinflussten Bereich werden durch den mittleren Meeresspiegel beeinflusst. Mit den Veränderungen des Abflussgeschehens und der Tidewasserstände werden sich u.a. Strömungen und Wasserstände in den Nebenflüssen verändern. Dies hat wiederum Auswirkungen auf alle damit verbundenen Prozesse, wie z.B. den Sedimenttransport.

In diesem Kapitel wurde die dritte, zu Beginn der Arbeit (Abschnitt 1.3) definierte, Fragestellung bearbeitet. Diese bezieht sich auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Nebenflüsse. Konkret wurden am Beispiel der Este und der Krückau drei relevante Aspekte betrachtet:

- i) Auswirkungen veränderter Klimaparameter auf den Binnenabfluss,
- ii) Auswirkungen eines veränderten Binnenabflusses und eines veränderten Meeresspiegels auf die statistische Einordnung seltener Schließereignisse,
- iii) Auswirkungen eines veränderten Meeresspiegels auf Morphodynamik in den tidebeeinflussten Unterläufen.

Die Grundlage für die Betrachtung dieser drei Aspekte bilden die Erkenntnisse aus der wasserbaulichen Systemanalyse sowie die entwickelten Modelle (vgl. Kapitel 4). Der bereits beschriebene Ist-Zustand dient zudem als Referenz bei der Analyse der Auswirkungen von Szenarien (veränderte Klimaparameter, Meeresspiegelanstieg).

Als Grundlage zur Beschreibung der Änderungen des Klimas dienen Modellergebnisse des Regionalen Klimamodells (REMO). Dabei wurden die Ergebnisse der ersten drei Realisierungen des SRES – Szenario A1B als Antrieb für die N-A-Simulationen verwendet. Auf diese Weise erfolgt eine erste Einschätzung der Bandbreite der Auswirkungen veränderter Klimaparameter auf den Binnenabfluss. Außerdem wurden Erkenntnisse zur modellinternen Variabilität gewonnen und wichtige Erfahrungen gesammelt, die einen wesentlichen Schritt bei der Automatisierung der Simulation von Abflüssen aus Klimamodellergebnissen darstellen.

Als Grundlage zur Beschreibung der Änderung des Meeresspiegels dienen eine Literaturrecherche sowie die Auswertung einer Sensitivitätsanalyse zu den Auswirkungen einer Anhebung des mittleren Meeresspiegels auf das Elbe-Ästuar, die von der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführt wurde.

Grundsätzlich lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

#### Krückau

- i) Mittlerer Abfluss (Grundlage: REMO A1B – Ensemble)
  - a. Die Änderungssignale für die Niederschlagssumme und für den mittleren Abfluss sind in allen drei Szenarien robust. Ein robustes Änderungssignal der Niederschlagssumme führt in allen Fällen zu einem robusten Änderungssignal des Abflusses.

- b. Mit Ausnahme der Herbstmonate spiegelt der mittlere Abfluss von der Tendenz her das Änderungssignal der Niederschläge wieder. Die Ausprägung ist allerdings nur gemittelt über das gesamte Jahr gleich. Die Ausprägung innerhalb der Jahreszeiten ist unterschiedlich groß. Im Winter und Frühling ist die relative Zunahme der Abflüsse stärker als die Niederschläge. Im Sommer ist der Rückgang des Abflusses geringer als der Rückgang der Niederschläge.
- ii) Hochwasserabfluss (Grundlage: REMO A1B – Ensemble)
- a. Die zukünftigen Änderungen der Hochwasserabflüsse definierter Wiederkehrintervalle (HQ1 bis HQ100) sind sehr gering ( $\pm 10\%$ ).
  - b. Die Aussagen innerhalb des betrachteten Ensembles sind zumeist indifferent.
- iii) Wiederkehrintervall seltener Schließereignisse
- a. Lastfall A und B: Das Wiederkehrintervall nimmt mit steigendem Meeresspiegel ab und mit steigendem Abfluss zu (Ausnahme: Este, Lastfall A).
  - b. Ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels reduziert die Wiederkehrintervalle der Lastfälle A und B deutlich. Aufgrund des sehr hohen Wiederkehrintervalls von Lastfall B im Ist-Zustand (10.675 Jahre) ist das Wiederkehrintervall selbst für den Fall eines deutlichen Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m immer noch vergleichsweise hoch (615 Jahre).
- iv) Morphodynamik
- a. Eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels um 0,25 m und um 0,5 m bewirkt eine deutliche Zunahme des Sedimentimports (MSL+0,25m: Faktor zwei, MSL+0,5m: Faktor drei). Eine Anhebung um 0,8 m bewirkt eine extreme Zunahme des Sedimentimports (Faktor elf). Das zusätzlich importierte Material wird in allen Fällen schwerpunktmäßig bei km 10,5, km 9,5, km 8,5 und im Elmshorner Hafen (km 1,0 – km 0,0) abgelagert.

## Este

- i) Mittlerer Abfluss (Grundlage: REMO A1B – Ensemble)
- a. Die Änderungssignale für die Niederschlagssumme und für den mittleren Abfluss sind nur für den Sommer und den Herbst robust. Ansonsten sind die Aussagen indifferent. Auch ein robustes Änderungssignal der Niederschlagssumme führt nicht zwangsläufig zu einem robusten Änderungssignal des Abflusses.
  - b. Im Winter, Sommer und Herbst spiegelt das Ensemble-Mittel des Abflusses von der Tendenz her das Änderungssignal des Ensemble-Mittels der Niederschläge wieder. Im Frühling sowie im Jahresmittel ist die Tendenz entgegengesetzt.
- ii) Hochwasserabfluss (Grundlage: REMO A1B – Ensemble)
- a. In zwei Realisierungen treten extreme Niederschlagsereignisse auf, aus denen Abflüsse resultieren, die das aktuelle HQ<sub>100</sub> um ein Mehrfaches übertreffen.
  - b. Um plausible Aussagen zur Jährlichkeit erhalten, müssen die extremen Werte entfernt werden. Die überprüften Ausreißertests sind hierfür ungeeignet. Als geeignet hat sich die manuelle Entfernung erwiesen, bei der alle Ereignisse deren Abfluss das bekannte HQ<sub>100</sub> um mehr als das Zweifache übersteigt, entfernt.

- c. Die zukünftigen Änderungen der Hochwasserabflüsse definierter Wiederkehrintervalle (HQ<sub>1</sub> bis HQ<sub>100</sub>) sind sehr gering ( $\pm 10\%$ ).
- d. Das Änderungssignal für das HQ<sub>5</sub> und das HQ<sub>10</sub> liegt im Bereich von 0 – 35% und für das HQ<sub>100</sub> im Bereich von 30 – 45%.

iii) Wiederkehrintervall seltener Schließereignisse

- a. Lastfall A und B: Das Wiederkehrintervall nimmt mit steigendem Meeresspiegel ab und mit steigendem Abfluss zu (Ausnahme: Lastfall A).
- b. Ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels reduziert die Wiederkehrintervalle der Lastfälle A und B deutlich. Aufgrund des sehr hohen Wiederkehrintervalls von Lastfall B im Ist-Zustand (15.490 Jahre) ist das Wiederkehrintervall selbst für den Fall eines deutlichen Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m immer noch vergleichsweise hoch (1.610 Jahre).

iv) Morphodynamik

- a. Eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels um 0,25 m und um 0,5 m bewirkt eine deutliche Zunahme des Sedimentimports um den Faktor drei. Das zusätzlich importierte Material wird in den unteren drei Gewässer-Kilometern (km 12,5 – km 9,5) abgelagert.
- b. Eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels um 0,8 m bewirkt ebenfalls eine Zunahme des Sedimentimports. Allerdings wird in diesem Szenario weniger Material importiert als in den beiden anderen Szenarien mit geringerem MSL – Anstieg. Das zusätzlich importierte Material wird in den unteren fünf Gewässer-Kilometern (km 12,5 – km 7,5) abgelagert.

## 6. Diskussion der wesentlichen Erkenntnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei wasserbauliche Fragestellungen bezüglich der tidebeeinflussten Nebenflüssen der Untereibe beantwortet. Konkret beziehen sich diese Fragestellungen auf

- i) die statistische Einordnung seltener Schließereignisse,
- ii) die Morphodynamik und morphologische Entwicklung und
- iii) mögliche<sup>19</sup> Auswirkungen des Klimawandels auf den Abfluss, den Hochwasserschutz und die Morphodynamik.

Im Rahmen der Bearbeitung wurde deutlich, dass der gewählte Ansatz, die wasserbauliche Systemanalyse, eine ideale Grundlage zur fundierten Beantwortung dieser umfassenden Fragestellungen bildet. Außerdem zeigte sich, dass sich die hydrologischen, hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse und Mechanismen in den Nebenflüssen prinzipiell ähneln, weshalb die angewandten Methoden auch auf andere Nebenflüsse übertragen werden können. Allerdings führen bereits geringfügig voneinander abweichende Eigenschaften der Nebenflüsse und ihrer Einzugsgebiete dazu, dass die gewonnenen Erkenntnisse nicht direkt auf die anderen Nebenflüsse übertragen werden können. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden untergliedert nach den drei Fragestellungen diskutiert.

### 6.1 Statistische Einordnung seltener Schließereignisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass im Ist-Zustand der Lastfall A (HQ<sub>5</sub>, ein gesperrtes Tnw) selten und der Lastfall B (HQ<sub>5</sub>, zwei gesperrte Tnw) extrem selten auftreten. In beiden Fällen ist das Wiederkehrintervall an der Krückau kleiner als an der Este, was im Wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass der Binnenwasserstand in der Krückau bei geschlossenem Sperrwerk aufgrund des deutlich größeren Stauraumes langsamer ansteigt als in der Este. Folglich sind die erforderlichen Tnw-Höhen, die erreicht werden müssen, damit das Sperrwerk geschlossen bleibt, geringer.

Anhand der beiden betrachteten Flüsse wird deutlich, dass mit einem pauschal definierten Lastfall, der für mehrere Nebenflüsse angewandt wird, keine in der Größenordnung vergleichbaren Wiederkehrintervalle (und damit auch keine vergleichbaren Risiken) erzielt werden können. Um ein vergleichbares Niveau für alle Nebenflüsse zu erhalten, ist für jeden Nebenfluss eine separate Betrachtung erforderlich, welche die spezifischen Charakteristiken des jeweiligen Nebenflusses berücksichtigt. Ob nun von einem oder zwei gesperrten Tnw ausgegangen wird, ist grundsätzlich abzuwägen. Eine Sperrung über zwei Tnw liegt einerseits auf der sicheren Seite und bietet einen Puffer für mögliche Veränderungen der Rahmenbedingungen (Klimawandel), führt aber andererseits

---

<sup>19</sup> Die Formulierung „mögliche Auswirkungen“ ist darauf zurückzuführen, dass sowohl die Änderung der Klimaparameter als auch die Größenordnung der Änderung des Meeresspiegels auf Grund verschiedener Unsicherheitsfaktoren nicht vorhersagbar ist. Dementsprechend ist auch das Ausmaß der Folgen nicht vorhersagbar. Allerdings ist es möglich, die Auswirkungen im Rahmen der zu erwartenden Bandbreiten zu ermitteln.

unter heutigen Rahmenbedingungen zu sehr hohen Wasserständen. Diese können wiederum hohe Kosten, z.B. durch überdimensionierte Hochwasserschutzanlagen, zur Folge haben.

## 6.2 Morphodynamik und morphologische Entwicklung

Der Vergleich der gemessenen Schwebstoffkonzentrationen im Mündungsbereich von Este und Krückau mit der Schwebstoffkonzentration im Bereich des Fahrwassers der Elbe ergibt indifferente Aussagen. Im Fall der Krückau wurde eine gute Übereinstimmung der Messwerte im Mündungsbereich mit den Messwerten der naheliegenden Dauermessstation D3 der WSV in der Hauptelbe festgestellt. Im Mündungsbereich der Este wurde eine bis zu fünffach höhere Schwebstoffkonzentration als in der Elbe (Dauermessstation D1) gemessen. Eine Erklärung hierfür sind lokale Effekte (Re-Suspendierung von frisch abgelagerten Sedimenten von den Wattflächen bei Flutstrom) im Bereich der Wattflächen des Mühlenberger Lochs. Das Ergebnis zeigt, dass nicht ohne weitergehende Betrachtungen davon ausgegangen werden kann, dass die Schwebstoffkonzentrationen in den Nebenflüssen eine ähnliche Größenordnung haben wie die Konzentration in der Elbe.

Die Auswertungen der Ergebnisse der hydrodynamisch-numerischen Modellierung zeigen, dass sowohl in der Este als auch in der Krückau unter den betrachteten Rahmenbedingungen (mittlere Tide- und Abflussverhältnisse) Schwebstoffe akkumuliert werden. Es gibt allerdings große Unterschiede in der Größenordnung der akkumulierten Mengen und in den Ablagerungsschwerpunkten. Die Este importiert deutlich mehr Sedimente als die Krückau und hat ihren Ablagerungsschwerpunkt zwischen dem Äußeren und dem Inneren Este-Sperrwerk. Die Krückau hat einen Ablagerungsschwerpunkt im Nahbereich des Sperrwerks und einen zusätzlichen Ablagerungsschwerpunkt im Bereich des Elmshorner Hafens.

Weiterhin geht aus den Modelluntersuchungen hervor, dass vor allem die morphologische Entwicklung der unteren Flussabschnitte (unteres Drittel der Krückau, unteres Viertel der Este) maßgeblich vom Schwebstoffgehalt des Flutstromes beeinflusst wird. In den mittleren Abschnitten (Krückau: mittleres Drittel, Este: zweites Viertel von unten) sind zwar noch Auswirkungen festzustellen, jedoch in einem deutlich geringeren Maß. In den übrigen Abschnitten sind praktisch keine Auswirkungen mehr festzustellen. Im Hochwasserfall (MHQ) werden die Unterläufe von Este und Krückau zu Sedimentexporteuren. In den meisten Abschnitten führen die höheren Fließgeschwindigkeiten bei Ebbstrom zu einer deutlichen Erosion. Eine Ausnahme hiervon bilden die Abschnitte in unmittelbarer Sperrwerksnähe, die entgegen dem Gesamttrend stärker verlanden. Weitere Ausnahmen gibt es im Fall der Krückau, wo einige weitere Abschnitte im Hochwasserfall stärker verlanden als bei normalen Bedingungen. Dazu gehört u.a. der Elmshorner Hafen.

Aus den Erkenntnissen lassen sich Rückschlüsse auf die Herkunft der Schwebstoffe ziehen. Die Schwebstoffe, die sich im Elmshorner Hafen ablagern, werden überwiegend mit dem Oberwasserzufluss eingetragen. Die Schwebstoffe, die sich im Bereich des Krückau-Sperrwerks ablagern, stammen überwiegend aus der Elbe, genau wie die Schwebstoffe, die sich im Bereich der Äußeren Este-Sperrwerks ablagern.

Die Auswertung der jährlichen Sohlpeilungen des Unterlaufs der Krückau für den Zeitraum 2006 – 2015 zeigt insgesamt einen Anstieg der mittleren Sohlhöhe. Dieser Anstieg ist in der oberen Hälfte des Unterlaufs (km 5,5 – km 0) ausgeprägter (0,2 - 0,3 m) als in der unteren Hälfte (0,1 - 0,15 m). Für den Nahbereich des Sperrwerks kann keine Aussage getroffen werden, da hier die Messdaten durch

regelmäßige Unterhaltungsmaßnahmen (Spülungen, Räumungen) beeinflusst sind. Aus der Tatsache, dass diese Maßnahmen erforderlich sind, kann jedoch geschlossen werden, dass hier ebenfalls eine Verlandungstendenz besteht.

Eine detaillierte Betrachtung der Querschnitte zeigt, dass die Veränderungen der mittleren Sohlhöhe im Wesentlichen auf die Änderungen der Sohlhöhen im Böschungsbereich zurückzuführen ist. Der Bereich um den Talweg ist mit einer Ausnahme stabil. Diese Ausnahme stellt der Elmshorner Hafen dar, der sowohl im Bereich des Talweges als auch im Bereich der Böschungen verlandet. Damit wird die Erkenntnis aus der Modellierung bestätigt, dass der Elmshorner Hafen einen Verlandungsschwerpunkt bildet. Aus dem Vergleich der Sohlhöhen mehrerer Nebenflüsse geht zudem hervor, dass die Sohle im Bereich des Elmshorner Hafens vergleichsweise tief liegt. In Kombination mit der vergleichsweise großen Breite und des hohen Schwebstoffgehalts des Binnenzuflusses ist die Verlandungstendenz plausibel zu erklären.

Der zeitliche Verlauf der Sohlentwicklung zeigt, dass das heutige höhere Sohlniveau auf hohe Auflandungsraten in den Jahren 2007 - 2009 (bzw. 2007 – 2010) zurückzuführen ist. Betrachtet man nur die Jahre nach 2010, dann ist entweder keine Tendenz (km 1,0 – km 0,0, km 9,5 – km 7,6) oder sogar eine leicht negative Tendenz (km 7,6 – km 1,0) erkennbar. An dieser Stelle wird deutlich, wie wichtig die Länge von Zeitreihen ist. Die alleinige Betrachtung der Zeiträume 2007 – 2010 oder 2010 – 2015 hätte zu anderen Schlüssen geführt als die Betrachtung der gesamten Zeitreihe. Aus morphologischer Sicht sind selbst neun Jahre (2007 – 2015) eher kurz, weshalb die Messungen weitergeführt werden sollten.

Die Kombination aus Modellierung und Messungen (Schwebstoffkonzentration, Sohlhöhen) ist sehr vorteilhaft. Zum einen dienen die Schwebstoffmessdaten als Randbedingungen, zum anderen können Modelle anhand der Messdaten verifiziert und optimiert werden.

Eine bemerkenswerte Erkenntnis, die aus den Untersuchungen hervorgeht, ist ein ähnliches Verhaltensmuster zwischen den abschnittsweise gemittelten Sohlhöhenänderungsraten in einem Abschnitt der Krückau (km 7,6 – km 0,0) und der mittleren Schwebstoffkonzentration in der Elbe nahe der Krückaumündung. In Jahren mit einer hohen Schwebstoffkonzentration tendiert der Abschnitt zur Verlandung. In Jahren mit einer niedrigen Schwebstoffkonzentration tendiert der Abschnitt zur Erosion. Die Daten sind korreliert ( $r = 0,58$ ). Es ist allerdings nicht eindeutig festzustellen, ob es sich hierbei tatsächlich um einen echten kausalen Zusammenhang oder um Zufall handelt, da einige Erkenntnisse aus den Modellrechnungen diesen aus Messdaten abgeleiteten Zusammenhang nicht eindeutig bestätigen und teilweise sogar widersprechen. Das kann daran liegen, dass Prozesse nicht ausreichend genau berücksichtigt wurden.

Zur abschließenden Klärung sind weitere Untersuchungen, wie u.a. die Fortführung der jährlichen Vermessung der Sohltopographie und weitere Sensitivitätsstudien mit hydrodynamisch-numerischen Modellen, erforderlich. Grundsätzlich wäre die Entwicklung vergleichsweise einfacher Modelle sehr hilfreich um aktuelle und künftige Fragestellungen im Bereich der Nebenflüsse zu bearbeiten und z.B. mögliche Auswirkungen von Anpassungen in der Unterelbe auf die Nebenflüsse abschätzen zu können.

### 6.3 Auswirkungen des Klimawandels

Als Grundlage zur Beschreibung der erwarteten Änderungen des Klimas dienen Modellergebnisse des Regionalen Klimamodells (REMO). Dabei werden die Ergebnisse der ersten drei Realisierungen des SRES – Szenario A1B als Antrieb für die N-A-Simulationen verwendet. Damit wird nicht zwangsläufig die gesamte Bandbreite aller zur Verfügung stehenden Klimamodellergebnisse für die Nebenflüsse abgedeckt. Allerdings werden auf diese Weise zum einen Erkenntnisse zur modellinternen Variabilität gewonnen und zum anderen Erfahrungen gesammelt, die einen wesentlichen Schritt bei der Automatisierung der Simulation von Abflüssen aus Klimamodellergebnissen darstellen. Eine Automatisierung ist anzustreben, um die gesamte Bandbreite aller verfügbaren Klimamodellergebnisse bei der Impaktmodellierung einbeziehen zu können, ohne dabei einen enormen Arbeitsaufwand zu generieren.

#### 6.3.1 Auswirkungen auf das Abflussgeschehen

Die Untersuchungen zeigen, dass es nicht in jedem Fall möglich ist, Rückschlüsse vom Änderungssignal der Niederschläge auf das Änderungssignal der mittleren Abflüsse zu ziehen. Zum Teil hat das Änderungssignal des Abflusses sogar ein entgegengesetztes Vorzeichen. Generell sind die Bandbreiten des Änderungssignals des mittleren Abflusses größer als die Bandbreiten des Änderungssignals des Niederschlags. Gründe hierfür sind zum einen die hydrologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete und zum anderen die mit den Temperaturen steigende Evapotranspiration.

Eine weitere Erkenntnis der Untersuchungen ist, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf den mittleren Abfluss in den Nebenflüssen unterschiedlich groß ausfallen, obwohl die Einzugsgebiete nahe beieinanderliegen und auf den ersten Blick vergleichbar erscheinen. Dies liegt zum einen abermals an unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften und zum anderen daran, dass die Änderungssignale des Niederschlags für die EZG trotz der räumlichen Nähe ungleich sind.

Wie sensitiv der mittlere Abfluss eines Gewässers auf den Klimawandel reagiert hängt u.a. davon ab, wie ausgeprägt der Jahresgang des Abflusses ist. Ein stark ausgeprägter Jahresgang führt dazu, dass in den trockeneren Sommermonaten bereits geringe Änderungen des Niederschlags zu großen Änderungen des Abflusses führen können.

Im Bereich der Hochwasserabflüsse zeigen die Auswertungen ebenfalls, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf den Hochwasserabfluss in den Nebenflüssen unterschiedlich groß ausfallen können. Für ausgewählte Ereignisse definierter Wiederkehrintervalle wurde im Fall der Krückau ein vergleichsweise kleines Änderungssignal und im Fall der Este ein großes Änderungssignal ermittelt. Beispielsweise umfasst die Bandbreite des Änderungssignals des HQ<sub>5</sub> (2051-2100) ⇔ (1951-2000) im Fall der Krückau ±10% und im Fall der Este 5 – 30%.

Eine besondere Auffälligkeit zeigten die Ergebnisse der N-A-Simulationen für die Este. Hier wurden unter Antrieb der Klimamodellergebnisse einige extrem hohe Abflüsse berechnet, die das derzeitige HQ<sub>100</sub> um ein Vielfaches (Faktor drei bis vier) übertreffen. Diese hohen Abflüsse sind auf Regenereignisse mit extrem hohen Intensitäten (>100 mm/h für den Zeitraum von 1h) zurückzuführen. Um im Rahmen der Auswertung plausible Aussagen zum Änderungssignal zu erhalten, müssen diese extremen Abflüsse, die eine größere Wahrscheinlichkeit haben als ihnen über die plotting position

zugewiesen wird, aus den Stichproben entfernt werden. Die untersuchten Ausreißertests, die in der Praxis zum Einsatz kommen, sind nur bedingt zu diesem Zweck geeignet. Es hat sich gezeigt, dass die manuelle Entfernung dieser extremen Werte (Abfluss ist größer als doppelte  $HQ_{100}$ ) am besten geeignet ist.

Die Auswertungen der N-A-Simulationen zeigen, dass die gemessenen Abflüsse an den Pegeln Emmen/Esté und A23/Krückau durch die Simulationsergebnisse, die für die Referenzperiode (1951-2000) aus dem REMO A1B – Ensemble berechnet werden, nicht sehr genau abgebildet werden. Für den Pegel A23/Krückau werden vor allem mittlere und erhöhte Abflüsse deutlich überschätzt. Hochwasserabflüsse werden gut getroffen. Für den Pegel Emmen/Esté werden niedrige Abflüsse unterschätzt und erhöhte Abflüsse überschätzt. Die Hochwasserabflüsse werden deutlich überschätzt. Diese Erkenntnis zeigt den weiteren Forschungsbedarf im Bereich der Klimamodellierung.

Insgesamt ist aus den Erkenntnissen zu folgern, dass die Auswirkungen veränderter Klimaparameter auf mittlere Abflüsse und Hochwasserabflüsse für jeden Nebenfluss individuell zu bestimmen sind. In die Auswertungen sollten so viele Ergebnisdatensätze von regionalen Klimamodellen wie möglich einfließen, um die mögliche Bandbreite zuverlässig eingrenzen zu können. Die Betrachtung einzelner Klimamodellergebnisse reicht hingegen nicht aus, um zuverlässige Aussagen zu erhalten. Bei den verwendeten Klimamodellergebnissen ist auf eine ausreichend hohe räumliche und zeitliche Auflösung zu achten. Eine hohe räumliche Auflösung ist erforderlich, um die regionalen Charakteristiken über den vergleichsweise kleinen Einzugsgebieten abschätzen zu können. Eine hohe zeitliche Auflösung ist erforderlich, um die vergleichsweise kurzen Hochwasserwellen in den Nebenflüsse abzubilden.

### 6.3.2 Auswirkungen auf das Wiederkehrintervall seltener Schließereignisse

Eine Erhöhung des Binnenzuflusses führt dazu, dass der Binnenwasserstand während der Sperrung schneller ansteigt. Dadurch fällt auch der Wasserstand zu den Eintrittszeitpunkten der  $T_{nw}$  der Kettentide höher aus. Dementsprechend müssen auch die während der Sperrung auftretenden  $T_{nw}$  höher ausfallen um den definierten Lastfall einer andauernden Sperrung über ein (Lastfall A) bzw. zwei (Lastfall B)  $T_{nw}$  zu erhalten. Da höhere  $T_{nw}$  seltener auftreten, wird somit das Wiederkehrintervall der beiden betrachteten Lastfälle A ( $HQ_5$ , ein gesperrtes  $T_{nw}$ ) und B ( $HQ_5$ , zwei gesperrte  $T_{nw}$ ) größer.

Ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels führt dazu, dass die  $T_{nw}$  insgesamt höher ausfallen. Dadurch nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass hohe  $T_{nw}$  auftreten. Dementsprechend wird das Wiederkehrintervall der beiden betrachteten Lastfälle A ( $HQ_5$ , ein gesperrtes  $T_{nw}$ ) und B ( $HQ_5$ , zwei gesperrte  $T_{nw}$ ) kleiner.

Aufgrund der gegensätzlichen Wirkung der beiden Komponenten Binnenabflusszunahme und Meeresspiegelanstieg auf das Wiederkehrintervall der Lastfälle besteht die Möglichkeit, dass sich die Auswirkungen des Klimawandels auf das Wiederkehrintervall zumindest teilweise neutralisieren.

Die Annahme des Lastfalls B liegt für heutige Bedingungen auf der sicheren Seite. Aus Sicht des Anpassungsbedarfs an den Klimawandel ist dies jedoch günstig, da noch genügend Puffer zur Kompensation eines möglichen Meeresspiegelanstiegs vorhanden ist. Auch im Fall eines Anstiegs um 0,8 m wäre das Sicherheitsniveau noch vergleichsweise hoch. Tiefgreifende Anpassungsmaßnahmen

wie Deicherhöhungen oder die Erweiterung von Stauraum wären im Fall eines 0,8 m höheren Meeresspiegels nicht zwangsläufig erforderlich.

Indessen kann dies erforderlich werden, wenn der Lastfall in der aktuellen Form bestehen bleibt und der Binnenabfluss signifikant zunimmt. Dies hätte einen höheren Binnenwasserstand zur Folge. Je nach Ausmaß der Zunahme des Binnenabflusses können Anpassungen (Sperrwerksbetrieb, Deicherhöhungen, zusätzlicher Stauraum) erforderlich werden.

### **6.3.3 Auswirkungen eines veränderten Meeresspiegels auf den Schwebstofftransport**

Insgesamt führt eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels dazu, dass mehr Sedimente in die Este und die Krückau importiert werden. Die zusätzlich importierten Sedimente verbleiben zu einem Großteil in den unteren drei Gewässerkilometern. Im Fall der Krückau nimmt außerdem die Verlandung im Bereich des Elmshorner Hafens zu. In Abschnitten, die im Ist-Zustand bereits eine Erosionstendenz aufweisen, nimmt die Erosion bei einem höheren Meeresspiegel zu.

Die Untersuchungen zeigen auch, dass zu differenzieren ist zwischen einer vergleichsweise moderaten Anhebung um 0,25 m bzw. 0,5 m und einer deutlichen Anhebung um 0,8 m. Im Fall einer Anhebung des mittleren Meeresspiegels um 0,8 m unterscheidet sich die Reaktion in beiden Flüssen deutlich von der Reaktion auf eine moderate Anhebung. Im Fall der Krückau steigt der Sedimentimport überproportional an (Faktor elf statt Faktor zwei (bei +0,25 m) bzw. drei (bei +0,5 m)). Im Fall der Este fällt der zusätzliche Sedimentimport im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien geringer aus (Faktor zwei statt Faktor drei (bei +0,25 m und bei +0,5 m)).

Ein mögliche Erklärung hierfür sind die Sperrwerke, die bei Wasserständen von etwas mehr als 0,5 m über MThw schließen. Mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg finden Schließungen häufiger statt und dauern länger an. Dementsprechend gewinnt der Einfluss der Sperrwerke mit steigendem Meeresspiegel an Bedeutung. Durch die Sperrungen wird einerseits verhindert, dass neue Sedimente aus der Elbe in die Nebenflüsse gelangen. Andererseits können Schwebstoffe im Fall einer Sperrung nahezu ungehindert sedimentieren. Zudem bewirkt eine Sperrung vor allem eine Reduktion der maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten, wodurch weniger Material erodiert wird. Die Sedimentbilanzen sprechen im Fall der Este für die Dominanz des erstgenannten und im Fall der Krückau für die Dominanz des zweitgenannten Effekts.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die Nebenflüsse auch in Bezug auf die Morphodynamik für jeden Nebenfluss individuell zu bestimmen sind. Bei den Szenarien zum Meeresspiegelanstieg sollten auch die Veränderungen, die im Inneren des Ästuars entstehen, berücksichtigt werden. Eine besondere Beachtung sollte dabei den Auswirkungen des Sperrwerksbetriebes zukommen.

## **7. Zusammenfassung und Ausblick**

### **7.1 Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit drei essentiellen wasserbaulichen Fragestellungen an den Nebenflüssen der Unterelbe. Deren Beantwortung ist sowohl für die zuständigen Verwaltungen als auch für die Bewohner der Einzugsgebiete von großer Relevanz. Die Fragestellungen beziehen sich auf i) den Hochwasserschutz, ii) die Morphodynamik und die morphologische Entwicklung und iii) die Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen sowie die Morphodynamik in den tidebeeinflussten Unterläufen.

Zu diesem Zweck wurde für zwei ausgewählte Nebenflüsse (Este und Krückau) eine wasserbauliche Systemanalyse durchgeführt, die den Kern der Arbeit bildet und die Grundlagen zur Beantwortung der Fragestellungen liefert.

Die erste Fragestellung bezieht sich auf die statistische Einordnung seltener Kombinationen aus hohen Binnenabflüssen und hohen Wasserständen in der Elbe, die zu einer lange andauernden Sperrung der Mündungssperrwerke führt. Diese Kombination ist seit dem Bau und der Inbetriebnahme der Mündungssperrwerke an den Nebenflüssen maßgebend für die Entstehung von Hochwasserständen. Diesbezüglich wurden unterschiedliche Lastfallkombinationen betrachtet und statistisch eingeordnet. Dabei wird deutlich, dass das Wiederkehrintervall eines in der Praxis gängigen Lastfalls extrem hoch ausfällt. Zudem zeigt sich, dass die Höhen der Wiederkehrintervalle an den Nebenflüssen unterschiedlich hoch sind, wodurch kein einheitliches Sicherheitsniveau erzielt wird. Dies erfordert für jeden Nebenfluss eine separate Betrachtung, die jeweils die spezifischen Charakteristiken des Nebenflusses berücksichtigt.

Die zweite Fragestellung bezieht sich auf die Morphodynamik und morphologische Entwicklung im tidebeeinflussten Unterlauf. Die Auswertung von Messdaten (Schwebstoffdaten, Peildaten) und Ergebnissen hydrodynamisch- numerischer Modelle zeigt, dass die Morphodynamik der Unterläufe im Wesentlichen geprägt wird durch die Tide, den Binnenabfluss sowie den Schwebstoffgehalt des Binnenabflusses und des Flutstromes der Elbe. Bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen werden sowohl in der Este als auch in der Krückau Schwebstoffe akkumuliert. Der wesentliche Ablagerungsschwerpunkt ist in beiden Fällen der Nahbereich des Sperrwerks. Die Krückau hat einen weiteren Ablagerungsschwerpunkt im Bereich des Elmshorner Hafens. Insgesamt wird deutlich, dass vor allem die morphologische Entwicklung der unteren Flussabschnitte (unteres Drittel der Krückau, unteres Viertel der Este) maßgeblich vom Schwebstoffgehalt des Flutstromes beeinflusst wird.

Die dritte Fragestellung bezieht sich auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Nebenflüsse. Diese sind in doppelter Hinsicht vom Klimawandel betroffen. Zum einen wird der Binnenabfluss dieser Flüsse maßgeblich von den Niederschlägen über den Einzugsgebieten geprägt, die sich wahrscheinlich in Zukunft signifikant ändern. Zum anderen werden Hydro- und Morphodynamik im tidebeeinflussten Bereich durch den mittleren Meeresspiegel beeinflusst, der in Zukunft wahrscheinlich schneller ansteigt als derzeit. Die Auswertung von Abflusszeitreihen der Este und der Krückau, die auf der Grundlage von unterschiedlichen Klimamodelleregebnissen simuliert wurden, zeigt, dass die Bandbreite des Änderungssignals des mittleren Abflusses generell größer ist als die Bandbreite des Änderungssignals des Niederschlags. Des Weiteren sind die Auswirkungen des Klimawandels auf mittlere und hohe Abflüsse in den Nebenflüssen unterschiedlich groß. Vor allem die

Hochwasserabflüsse weisen einerseits erhebliche (Este) und andererseits geringe (Krückau) Änderungssignale auf. Daran wird deutlich, dass für jeden Nebenfluss eine differenzierte Betrachtung erforderlich wird, um die Auswirkungen des Klimawandels abschätzen zu können.

In Bezug auf die Wiederkehrintervalle seltener Schließereignisse wirken sich eine Zunahme des Binnenabflusses und eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels gegensätzlich aus. Ein höherer Binnenabfluss erhöht das Wiederkehrintervall, ein höherer Meeresspiegel reduziert das Wiederkehrintervall. In diesem Zusammenhang erweist sich der in der Praxis angesetzte Lastfall als vorteilhaft, da dieser sehr auf der sicheren Seite liegt und dementsprechend über einen Puffer verfügt.

Hinsichtlich der Morphodynamik zeigen systematische Untersuchungen, dass eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels zu einer Erhöhung des Sedimentimports in die Este und die Krückau führt. Ein Großteil des Materials verbleibt in den unteren drei Gewässerkilometern. Insgesamt ändert sich das Verhalten einzelner Gewässerabschnitte jedoch nicht, d.h. Erosions- bzw. Auflandungstendenzen bleiben in der Regel auch bei einem höheren Meeresspiegel erhalten. Mit steigendem Meeresspiegel gewinnt außerdem der Einfluss der Sperrwerkssteuerung auf die Morphodynamik an Bedeutung. Dabei sind die Auswirkungen der Sperrwerkssteuerung in beiden Flüssen gegensätzlich. Im Fall der Krückau steigt der Sedimentimport im Vergleich zu den Szenarien, die von einem geringeren Anstieg ausgehen, drastisch an. Im Fall der Este sinkt der Sedimentimport im Vergleich zu den Szenarien, die von einem geringeren Anstieg ausgehen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die genannten Fragestellungen nicht pauschal für alle Nebenflüsse beantwortet werden können. Stattdessen bedarf es einer differenzierten Betrachtung der einzelnen Nebenflüsse. Die im Rahmen dieser Arbeit angewandten Methodiken und übergeordneten Erkenntnisse können (und sollten) übertragen werden. Eine umfassende wasserbauliche Systemanalyse ist grundsätzlich empfehlenswert, um komplexe wasserbauliche Fragestellungen fundiert zu beantworten.

## **7.2 Ausblick**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine detaillierte wasserbauliche Systemanalyse als Grundlage zur Beantwortung komplexer wasserbaulicher Fragestellungen an den Nebenflüssen der Unterelbe durchgeführt. Es zeigte sich, dass die gewonnenen Erkenntnisse sowie die erstellten Instrumente (numerische Modelle) eine fundierte Beantwortung der eingangs definierten Fragestellungen ermöglichen. Aus den durchgeführten Untersuchungen geht weiterer Forschungsbedarf hervor. Außerdem lässt sich aus den dargelegten Erkenntnissen auch ein möglicher Anpassungs- bzw. Optimierungsbedarf im Rahmen wasserwirtschaftlicher Aufgaben ableiten. Beide Aspekte werden im Folgenden spezifisch für jede der bearbeiteten Fragestellungen umrissen.

### **7.2.1 Statistische Einordnung seltener Schließereignisse**

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass der in der Praxis häufig angesetzte Lastfall aus einer Kombination eines fünfjährlichen Binnenhochwassers mit einer Sperrung über drei Tidehochwasser ein sehr großes Wiederkehrintervall aufweist. Aufgrund unterschiedlicher Charakteristiken der Nebenflüsse wird außerdem kein einheitliches Wiederkehrintervall und damit auch kein einheitliches Sicherheitsniveau erreicht. Ein Ziel der zukünftigen Aktivitäten sollte die

flussübergreifende Vereinheitlichung des Wiederkehrintervalls und damit auch des Sicherheitsniveaus sein. In diesem Zusammenhang ist für jeden Nebenfluss eine separate Betrachtung erforderlich, bei der die spezifischen Charakteristiken in die Auswertungen einbezogen werden. Im Rahmen einer umfangreichen Anpassung des Bemessungslastfalls mit dem Ziel eines deutlich geringeren Wiederkehrintervalls sollten die zu erwartenden Folgen des Klimawandels unbedingt Berücksichtigung finden, da das derzeit hohe Sicherheitsniveau einen Puffer zur Kompensation eines deutlichen Meeresspiegelanstiegs bietet.

### **7.2.2 Morphodynamik und morphologische Entwicklung**

Es konnte gezeigt werden, dass die Unterläufe von Este und Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen Sedimente importieren und im Fall von Binnenhochwassern Sedimente exportieren. Außerdem konnte gezeigt werden, dass eine Anhebung des mittleren Meeresspiegels dazu führt, dass bei mittleren Verhältnissen noch mehr Sedimente in die Este und die Krückau importiert werden. Diese verbleiben zu einem Großteil in den unteren drei Gewässer-Kilometern. Außerdem gewinnt der Einfluss der Sperrwerkssteuerung mit steigendem Meeresspiegel zunehmend an Einfluss. Ein signifikanter Anstieg der Häufigkeiten der Sperrungen wirkt sich ungünstig auf die morphologische Entwicklung aus, indem die Verlandung begünstigt wird.

In Anbetracht der vergleichsweise großen Modellunsicherheiten bei der Modellierung der Morphodynamik und der morphologischen Entwicklung sind die Erkenntnisse anhand weiterer Untersuchungen zu vertiefen und zu verfeinern. Mögliche Ansätze sind z.B. weitere Sensitivitätsstudien oder stochastische Ansätze bei der Festlegung der zu parametrisierenden Werte. Auf diese Weise können u.a. auch Unsicherheitsbereiche besser eingegrenzt werden. Außerdem sind die Modellansätze weiter zu verfeinern, um Prozesse, die bisher parametrisiert abgebildet werden, präziser abbilden zu können.

Sowohl für die Anwendung als auch für die Weiterentwicklung von Modellvorstellungen und Modellansätzen ist die Einbeziehung von Messdaten essentiell. Nur auf dieser Grundlage kann eine zuverlässige Kalibrierung und Validierung sowie eine Weiterentwicklung von Modellansätzen und Modellen erfolgen. Dementsprechend sollten auch zukünftige Modelluntersuchungen stets von Messungen in der Natur und im Labor begleitet werden. Außerdem können auf der Grundlage von längeren Messreihen möglicherweise sogar einfache Ansätze, wie der in Abschnitt 4.4.2 vorgestellte Zusammenhang, abgeleitet werden. Allerdings ist bei Messungen in der Natur unbedingt erforderlich eine hohe Datenqualität und eine einheitliche Auswertemethodik sicherzustellen, um zuverlässige Aussagen ableiten zu können.

### **7.2.3 Auswirkungen des Klimawandels**

Durch die Weiterentwicklungen im Bereich der regionalen Klimamodelle ist die zeitliche und räumliche Auflösung der Ergebnisse dieser Modelle ausreichend, um detaillierte Analysen hinsichtlich der Auswirkungen der veränderten Klimaparameter auf den Abfluss von Flüssen mit kleinen Flusseinzugsgebieten sinnvoll durchführen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Verwendung eines detaillierten, integrierten, prozessbasierten Modellierungsansatzes grundsätzlich geeignet ist, um die Auswirkungen von veränderten Klimaparametern auf den Abfluss im Gewässer zuverlässig bestimmen zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen zeigten sich jedoch Ansatzpunkte für zukünftige Forschungen und einen Optimierungen. Die Auswertungen der Ergebnisse für die Einzugsgebiete der Este und der Krückau zeigen, dass die Aussagen des betrachteten REMO A1B-Ensembles nicht immer robust sind. Außerdem fällt die Bandbreite des Abflusses in der Regel größer aus als die Bandbreite des Niederschlags. Dementsprechend müssen möglichst viele unterschiedliche Ergebnisdatensätze von regionalen Klimamodellen in die Auswertungen einbezogen werden, um die Bandbreite der möglichen Auswirkungen möglichst umfassend abzudecken. Diesem Bestreben steht der hohe Zeit- und Rechenaufwand bei der Verwendung eines detaillierten, integrierten Ansatzes gegenüber.

Zur Reduktion dieses Aufwands ist eine weitgehende Automatisierung des Pre- und des Post-Processings bei der Impaktmodellierung sinnvoll. Ein großes Automatisierungspotential besteht bei den N-A-Simulationen. Da die Eingangsdaten aus der Klimamodellierung bereits in einem definierten Standard zu Verfügung stehen, bietet es sich an, Routinen zu entwickeln, die die Daten entsprechend den Anforderungen der Impaktmodelle aufbereiten und automatisch einlesen. Auch im Bereich des Post-Processings können automatisierte Routinen die systematische Auswertung wesentlich erleichtern.

Im Bereich der Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Morphodynamik besteht weiterhin ein großer Forschungsbedarf, der sich nicht nur auf die Einbeziehung von möglichst vielen Szenarien beschränkt, sondern auch die verbesserte Abbildung der Prozesse im Modell einschließt. Es sollte das Ziel sein, die Modellunsicherheiten weiter zu verringern, um noch zuverlässigere Aussagen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels treffen zu können. Dabei sind die Erhebung und die Auswertung von Naturdaten eine unabdingbare Voraussetzung (s. Abschnitt 7.2.2).

Die im Rahmen der Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels gewonnenen Erkenntnisse sowie die entwickelten Instrumente stellen außerdem die Grundlage für den nächsten Schritt dar - die Entwicklung und Analyse von Anpassungsmaßnahmen. Auch in dieser Hinsicht ist der vorgestellte Ansatz der detaillierten integrierten Betrachtung vorteilhaft, da es möglich ist, die Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen präzise zu analysieren. Auf diese Weise können geeignete Anpassungsmaßnahmen sicher identifiziert werden. (Nehlsen et al. 2014) zeigen hierfür bereits ein erstes Anwendungsbeispiel für die Anpassung des Hochwasserschutzes im Bereich der Krückau und deren Einzugsgebiet.

# Anhang

## Äquivalente Sandrauheiten ( $k_s$ -Werte)

Tabelle 34: Im Rahmen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung angesetzte äquivalente Sandrauheiten ( $k_s$ -Wert)

Lage (Este und Krückau)	Äquivalente Sandrauheit $k_s$
Flussschlauch Unterläufe (unbefestigt)	0,01 – 0,03
Böschungen Unterläufe (befestigt)	0,1 - 0,15
Fluss Oberläufe	0,05 – 0,15
Gräben/ Wettern	0,03 – 0,06
Vorland (begrünt)	0,25
Vorland (Siedlung)	0,15

**Parametrisierungen Sedimente/Schwebstoffe****Tabelle 35: : Im Rahmen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung angesetzte Parameter zu Beschreibung der Eigenschaften der Sedimente und Schwebstoffe**

<b>Parameter</b>	<b>Este</b>	<b>Krückau</b>
Kritische Depositionsschubspannung	0,05 bis 0,10 N/m <sup>2</sup>	0,05 bis 0,10 N/m <sup>2</sup>
Trockenrohddichte	1250 – 2000 kg/m <sup>3</sup>	1250 – 2000 kg/m <sup>3</sup>
Kritische Erosionsschubspannung (Suspended Layer)	0,2 – 1,0 N/m <sup>2</sup>	0,2 – 1,0 N/m <sup>2</sup>
Kritische Erosionsschubspannung (Bed Layer)	0,5 – 2,0 N/m <sup>2</sup>	0,5 – 2,0 N/m <sup>2</sup>
Erodibilitätsfaktor (Suspended Layer)	0,02 – 0,05 g/m <sup>2</sup> /s	0,02 – 0,05 g/m <sup>2</sup> /s
Erodibilitätsfaktor (Bed Layer)	0,05 – 0,1 g/m <sup>2</sup> /s	0,05 – 0,1 g/m <sup>2</sup> /s
Sinkgeschwindigkeit	7,5 * 10 <sup>-6</sup>	2,5 * 10 <sup>-5</sup>

## Gemessene Korngrößen an der Gewässersohle

Tabelle 36: Korngrößen im Unterlauf der Este

Abschnitt	Gewässer km	Länge in km	Korngrößen (d in mm)					
			Flussschlauch			Böschungen		
Hafen Buxtehude	0,25 – 0,7	0,45	mittelsandiger Feinsand mit schluffigem Anteil			feinsandiger Mittelsand mit schluffigem Anteil		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			0,088	0,180	0,350	0,088	0,180	0,350
Neuland	0,7 – 2,9	2,2	mittelsandiger Feinsand mit schluffigem Anteil			feinsandiger Mittelsand mit schluffigem Anteil		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			0,088	0,180	0,350	0,088	0,180	0,350
Moorende 1	2,9 – 4,0	1,1	Schluff			Schluff		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			0,005	0,037	0,006	--	0,024	0,042
Moorende 2	4,0 – 5,0	1,0	Mittelsand mit feinsandigem Anteil			Mittelsand mit feinsandigem Anteil		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			0,171	0,351	0,892	0,171	0,351	0,892
Este- brücke	5,0 – 5,6	0,6	Schluff			Schluff		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			--	0,025	0,042	--	0,025	0,045
Hove	5,6 – 8,1	2,5	feinsandiger Mittelsand mit schluffigem Anteil			Schluff		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			--	0,300	1,130	0,002	0,021	0,042
Leeswig	8,1 – 11,0	2,9	feinsandiger Mittelsand mit schluffigem und grobsandigen Anteil			Schluff		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			0,088	0,180	0,350	0,002	0,015	0,021
Inneres Sperrwerk	11,0 – 11,4	0,4	Schluff			Schluff		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			0,002	0,026	0,045	0,002	0,026	0,045
Äußeres Sperrwerk	11,4 – 12,4	1,0	Schluff			Schluff		
			d10	d50	d90	d10	d50	d90
			0,002	0,032	0,051	0,002	0,032	0,051

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hydrographische Übersichtskarte der Unterelbe und ihre Nebenflüsse.....	1
Abbildung 2: Beispielhafte Kalibriergerade für OBS Sonden .....	13
Abbildung 3: 3D Darstellung der aufbereiteten Fächerlotdaten am Beispiel der Krückau .....	16
Abbildung 4: Konzept der Modellkette zur integrierten Modellierung.....	16
Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Vernetzung der Teileinzugsgebiete der Este im Bereich Moissburg .....	19
Abbildung 6: Gemessener und simulierter Abfluss am Pegel Emmen (Hochwasser Juli 2002).....	20
Abbildung 7: Dauerlinien des gemessenen und simulierten Abflusses am Pegel Emmen (1995 – 2014) .....	21
Abbildung 8: Bodenlayermodell für kohäsive Sedimente in tidebeeinflussten Flüssen mit Entwicklung der charakteristischen Größen bzw. Parameter über die Tiefe (aus Donner 2014).....	27
Abbildung 9: Finite-Elemente-Gitter eines Gewässerabschnittes der Este .....	28
Abbildung 10: Energiehöhenbeziehungen für unterschiedliche spezifische Abflüsse am Beispiel des Wehrs am Marschtorzwinger (Este) .....	29
Abbildung 11: Gemessene und simulierte Strömungsgrößen in der Este (04.03.2008 15:00 - 05.03.2008 09:00, km 2,0, Messdaten: WSA Hamburg).....	30
Abbildung 12: Streudiagramm der gemessenen und simulierten Geschwindigkeiten in der Este bei km 2,0 (04.03.2008 15:00 - 05.03.2008 09:00, Messdaten: WSA Hamburg) .....	31
Abbildung 13: Streudiagramm der gemessenen und simulierten Wasserstände in der Este bei km 0,5 (04.03.2008 15:00 - 05.03.2008 09:00, Messdaten: WSA Hamburg) .....	32
Abbildung 14: Korngrößenverteilungen des Sohlmaterials in der Este an ausgewählten Standorten... 33	
Abbildung 15: Gemessene und simulierte Schwebstoffkonzentration in der Este (22.07.2014 05:00 - 22.07.2014 19:00).....	33
Abbildung 16: Streudiagramm der gemessenen und simulierten Schwebstoffkonzentration in der Este bei km 11,0 (04.03.2008 15:00 - 05.03.2008 09:00, Messdaten: WSA Hamburg) .....	34
Abbildung 17: Topographische Übersichtskarte des Einzugsgebietes der Unterelbe .....	37
Abbildung 18: Mittlere Tideverläufe des Wasserstands für das Jahr 2010 an verschiedenen Positionen in der Unterelbe (Daten: WSV) .....	43

Abbildung 19: Mittlere Tideverläufe der oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeit für das Jahr 2010 an verschiedenen Positionen in der Unterelbe (Daten: WSV).....	44
Abbildung 20: Verhältnis der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten zu den maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten in der Unterelbe, gemittelt über einen Spring-/Nippzyklus vom 11.06.2006 – 25.06.2006 unter Variation des Oberwasserzuflusses (aus BAW 2011).....	45
Abbildung 21: Abflussganglinie am Pegel Neu Darchau (1878-2013) (Daten: WSV).....	47
Abbildung 22: Jahresgang der mittleren Monatsabflüsse am Pegel Neu Darchau (1998-2013) (Daten: WSV).....	47
Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung von MThw und MTnw an den Pegeln Cuxhaven, Kollmar und Cranz (Daten: WSA) .....	48
Abbildung 24: Ausgewählte Tidekennwerte in der Unterelbe (Daten: WSV) .....	49
Abbildung 25: Schematischer Tideverlauf und Abgrenzung von Tnw- Folgen (in Anlehnung an (Jensen et al. 2011)).....	50
Abbildung 26: Maximal erreichte Basishöhe durch Tnw – Folgen (n = 1 bis 3) am Pegel Cuxhaven im Zeitraum 1960-2014 (Daten: WSV).....	51
Abbildung 27: Maximal erreichte Basishöhe durch Tnw – Folgen (n = 1 bis 3) am Pegel Cranz im Zeitraum 1960-2014). (Daten: WSV).....	51
Abbildung 28: Sohlhöhen entlang der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe (Topographie 2010) im Längsschnitt (Daten: WSA Hamburg).....	53
Abbildung 29: Verteilung von Schwebstoff- und Salzgehalt in Abhängigkeit vom Oberwasser (Daten: Hubschrauberlängsprofile ARGE ELBE) (aus (Kappenberg und Fanger 2007), verändert) .....	59
Abbildung 30: Statistik von Schwebstoff- und Salzgehalt im Längsschnitt der Tide-Elbe: Mittelwerte von 1979 bis 2005 (durchgezogene schwarze Linien), Variationsbereich von einer Standardabweichung (farbige Flächen) und prozentuale Variation (punktierter Linien, rechte Achse). (Daten: Hubschrauberlängsprofile ARGE ELBE) (aus Kappenberg und Fanger 2007, verändert) .....	60
Abbildung 31: Korngrößenspezifische Baggermengenentwicklung 2002 bis 2011 für die Unterelbe (Gebiet inneres Ästuar) inklusive der Bereiche Hamburg und NOK (Daten: WSV, HPA) (aus BFG 2014).....	61
Abbildung 32: Hydrographische Karte des Einzugsgebietes der Unterelbe .....	64
Abbildung 33: Geländehöhen und Entwässerungsnetz im Bereich des Unterlaufs der Krückau.....	67
Abbildung 34: Historische Übersichtskarte des Bereichs um den Unterlauf der Krückau (Auszug aus der Topographisch Militärische Charte des Herzogtums Holstein 1789-1796, Varendorf 1984).....	68
Abbildung 35: Deich an der Krückau.....	69

Abbildung 36: Das geschlossene Krückau-Sperrwerk, Blick in Richtung Elbe .....	71
Abbildung 37: Durchschnittliche Anzahl der Schließungen pro Jahr (Zeitraum 1990 - 2010) ausgewählter Mündungssperrwerke von Nebenflüssen der Unterelbe (Daten: WSA Hamburg).....	72
Abbildung 38: Wettern im Deichhinterland der Este .....	73
Abbildung 39: Siel an der Este.....	73
Abbildung 40: Schöpfwerk an der Este.....	73
Abbildung 41: Entwässerungsstruktur in den Niederungsbereichen im südwestlichen Schleswig-Holstein (aus AG Niederungen 2050 2014) .....	74
Abbildung 42: Standorte der Schöpfwerke an ausgewählten Nebenflüssen und die aufsummierte nominelle Förderleistung der Schöpfwerke je Nebenfluss (Zusammenstellung nach Stadelmann 2010 und Angaben der Entwässerungsverbände).....	75
Abbildung 43: Längsschnitte ausgewählter Nebenflüsse im Jahr 2010. Dargestellt ist der tiefste Sohlpunkt der vermessenen Querschnitte (Daten: WSV) .....	77
Abbildung 44: Längsschnitte ausgewählter Nebenflüsse im Jahr 2010. Dargestellt ist die Gewässerbreite 1 m unterhalb des mittleren Tidehalbwassers auf der Grundlage der vermessenen Querschnitte (Daten: WSV) .....	78
Abbildung 45: Verfügbarer Stauraum in den Gewässerquerschnitten und dem Deichvorland der Nebenflüsse stromauf der Mündungssperrwerke in Abhängigkeit von der Einstauhöhe.....	80
Abbildung 46: Typische Uferbeschaffenheiten am Unterlauf der Este: Röhricht bei Buxtehude Neuland (oben links), Steinschüttung (oben rechts), Spundwand bei Hove (unten links), Sohle bei Estebrügge (unten rechts).....	81
Abbildung 47: Typische Uferbeschaffenheiten am Unterlauf der Este: Röhricht und Buschbewuchs beim Segelhafen Elmshorn (oben links), Spundwände im Elmshorner Hafen (oben rechts), Steinschüttung bei Seester (unten links), Steinschüttungen im Sperrwerksbereich (unten rechts) .....	82
Abbildung 48: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für die Einzugsgebiete sieben ausgewählter Nebenflüsse der Tideelbe für den Zeitraum 1981-2010 (Daten: DWD) .....	84
Abbildung 49: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags gemittelt über die Einzugsgebiete sieben ausgewählter Nebenflüsse der Tideelbe für zwei unterschiedliche Zeitscheiben (Daten: DWD).....	85
Abbildung 50: Mittlere Tagesabflüsse an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau, (Daten: NLWKN, LKN-SH) .....	87
Abbildung 51: Abflussdauerlinien an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau, (Daten: NLWKN, LKN-SH).....	88

Abbildung 52: Jahresgang des Abflusses an den Pegel Emmen/Este und A23/Krückkau, (Daten: NLWKN, LKN-SH) .....	88
Abbildung 53: Ganglinien des Mittelwerts für die Pegel Emmen/Este und A23/Krückkau, (Daten: NLWKN, LKN-SH) .....	89
Abbildung 54: Mittlerer Jahresgang des Abflusses am Pegel Emmen/Este für die Zeiträume 1961-1990 und 1981-2010, (Daten: NLWKN).....	90
Abbildung 55: Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen an die Stichprobe der Jahresmaxima am Pegel Emmen/Este.....	91
Abbildung 56: Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen an die Stichprobe der Jahresmaxima am Pegel A23/Krückkau.....	91
Abbildung 57: Abflüsse an ausgewählten Stationen im Unterlauf der Este.....	94
Abbildung 58: Abflüsse an ausgewählten Stationen im Unterlauf der Krückau .....	95
Abbildung 59: Abflüsse im Unterlauf der Este bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	95
Abbildung 60: Abflüsse im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014) .....	96
Abbildung 61: Vergleich der Abflüsse in den Unterläufen von Este und Krückau .....	96
Abbildung 62: Wasserstände bei mittlerem Oberwasserzufluss (MQ) an ausgewählten Stationen im Unterlauf der Este.....	98
Abbildung 63: Wasserstände bei mittlerem Oberwasserzufluss (MQ) an ausgewählten Stationen im Unterlauf der Krückau.....	98
Abbildung 64: Ausgewählte Tidekennwerte des Wasserstands in der Este bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	99
Abbildung 65: Ausgewählte Tidekennwerte des Wasserstands in der Krückau bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014).....	100
Abbildung 66: Strömungsgeschwindigkeiten im Unterlauf der Este bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014) .....	101
Abbildung 67: Strömungsgeschwindigkeiten im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tideverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014) .....	102
Abbildung 68: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten in den Unterläufen von Este und Krückau .....	103
Abbildung 69: Ganglinien Lastfall A, schematische Darstellung .....	104

Abbildung 70: Ganglinien Lastfall B, schematische Darstellung .....	106
Abbildung 71: Simulierte Wasserstandsganglinien an den Binnenpegeln der Sperrwerke während des ausgewählten Lastfalls (HQ <sub>5</sub> plus 60% Schöpfwerksleistung bei zwei gesperrten Tnw in Folge) .....	107
Abbildung 72: Streudiagramm der Tnw an den Pegeln Cuxhaven und Kollmar sowie Transferfunktionen zur Übertragung, Zeitraum 01.11.1980 – 31.10.2011, (Daten: WSV).....	109
Abbildung 73: Streudiagramm des simulierten und der gemessenen Werte am Pegel Kollmar, Zeitraum 01.11.1964 – 31.10.2011, (Daten: WSV) .....	109
Abbildung 74: Streudiagramm der Tagesmittelwerte des Abflusses am Pegel A23 (Krückau) und dem höchsten Tages-Tideniedrigwasser am Pegel Kollmar (Elbe), Zeitraum 01.11.1995- 31.10.2014, (Daten: WSV).....	110
Abbildung 75: Tagesmittelabfluss am Pegel A23 und Tnw-Höhen am Pegel Kollmar im Dezember 2013, (Daten: LKN-SH, WSV) .....	111
Abbildung 76: Tagesmittelabfluss am Pegel A23 und Tnw-Höhen am Pegel Kollmar im Oktober/November 1998, (Daten: LKN-SH, WSV) .....	112
Abbildung 77: Streudiagramm des Tnw (Tnw) und des vorangegangenen Tnw (Tnw-1) am Pegel Kollmar (Elbe), Zeitraum 01.11.1995- 31.10.2014, (Daten: WSV).....	112
Abbildung 78: Streudiagramm des erhöhten Tnw (Tnw) und des vorangegangenen erhöhten Tnw (Tnw-1) am Pegel Kollmar (Elbe), alle Tnw > 2 m Windstau, Zeitraum 01.11.1995- 31.10.2014, (Daten: WSV).....	113
Abbildung 79: Dauer von starken Windereignissen aus westlichen Richtungen, Station Helgoland (Daten: DWD).....	114
Abbildung 80: Varianten der Überlagerung eines Windfensters von 12,4 h mit der Tide.....	115
Abbildung 81: Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen an die Stichprobe der Jahresmaxima mit mindestens zwei Metern Windstau am Pegel Cranz nach der Este – Mündung .....	116
Abbildung 82: Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen an die Stichprobe der Jahresmaxima mit mindestens zwei Metern Windstau am Pegel Kollmar nach der Krückau – Mündung.....	116
Abbildung 83: Gemessene und simulierte Datenpaare sowie Linien gleicher Wiederkehrintervalle für den Pegel Cranz.....	118
Abbildung 84: Gemessene und simulierte Datenpaare sowie Linien gleicher Wiederkehrintervalle für den Pegel Kollmar .....	118
Abbildung 85: Gemessener Verlauf der Schwebstoffkonzentration und des Wasserstandes am Äußeren Este-Sperrwerk, Messzeitraum 16.07.2014-30.07.2014 .....	120

Abbildung 86: Gemessener Verlauf der Schwebstoffkonzentration und des Wasserstandes am Krückau-Sperrwerk, Messzeitraum 25.06.2014-10.07.2014.....	121
Abbildung 87: Oben: In der Este gemessene Schwebstoffkonzentration der Einzeltiden, gemittelte Schwebstoffkonzentration, gemittelter Wasserstand; unten: simulierte Fließgeschwindigkeit für gemittelten Wasserstandsverlauf.....	124
Abbildung 88: Oben: In der Krückau gemessene Schwebstoffkonzentration der Einzeltiden, gemittelte Schwebstoffkonzentration, gemittelter Wasserstand; unten: simulierte Fließgeschwindigkeit für gemittelten Wasserstandsverlauf.....	124
Abbildung 89: Gemessene Schwebstoffkonzentrationen und Abflüsse in der Este im Stadtbereich Buxtehude und ermittelter funktionaler Zusammenhang zwischen Abfluss und Schwebstoffkonzentration.....	125
Abbildung 90: Gemessene Schwebstoffkonzentrationen und Abflüsse im Oberlauf an drei Messprofilen und ermittelte funktionale Zusammenhänge zwischen Abfluss und Schwebstoffkonzentration (aus Donner 2014).....	125
Abbildung 91: Mittlere Schwebstoffkonzentration im Unterlauf der Este bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	126
Abbildung 92: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	127
Abbildung 93: Advektive Schwebstofftransportraten des Ebb- und des Flutstromes im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	128
Abbildung 94: Simulierte Sohländerungen im Unterlauf der Este bei km 10,5 bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	128
Abbildung 95: Simulierte Sohländerungen im Unterlauf der Este bei km 9,0 bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	129
Abbildung 96: Mittlere Schwebstoffkonzentration im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014).....	130
Abbildung 97: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014).....	131
Abbildung 98: Advektive Schwebstofftransportraten des Ebb- und des Flutstromes im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014).....	131
Abbildung 99: Simulierte Sohländerungen (in m) im Unterlauf der Krückau bei km 0,0 (Hafen Elmshorn) bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014).....	132

Abbildung 100: Simulierte Sohländerungen (in m) im Unterlauf der Krückau bei km 7,0 (Seestermühe) bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014).....	133
Abbildung 101: Ganglinie der gemittelten Schwebstoffkonzentration sowie Ganglinien der mittleren Schwebstoffkonzentration $\pm$ der doppelten Standardabweichung im Mündungsbereich der Este.....	135
Abbildung 102: Ganglinie der gemittelten Schwebstoffkonzentration sowie Ganglinien der mittleren Schwebstoffkonzentration $\pm$ der doppelten Standardabweichung im Mündungsbereich der Krückau	135
Abbildung 103: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este für bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation der am unteren Modellrand eingesteuerten Schwebstoffkonzentration (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	137
Abbildung 104: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau für bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation der am unteren Modellrand eingesteuerten Schwebstoffkonzentration (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014).....	138
Abbildung 105: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este für bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation der Sinkgeschwindigkeiten (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	140
Abbildung 106: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau für bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation der Sinkgeschwindigkeiten (25.06.2014 – 10.07.2014).....	141
Abbildung 107: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este für bei mittleren Tideverhältnissen unter Variation des Oberwasserzuflusses (Simulationszeitraum 17.07.2014 – 31.07.2014).....	143
Abbildung 108: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau für bei mittleren Tideverhältnissen unter Variation des Oberwasserzuflusses (MQ und HQ) (Simulationszeitraum 25.06.2014 – 10.07.2014).....	144
Abbildung 109: Längsschnitte der Sohlhöhen des Talweges im Unterlauf der Krückau.....	147
Abbildung 110: Unterwassertopographie im Unterlauf der Krückau (km 8,8 – km 9,8) bei Störenhaus im Nov 2015.....	148
Abbildung 111: Sohltopographie der Krückau bei km 2,0 zwischen 2006 und 2015.....	149
Abbildung 112: Sohltopographie der Krückau bei km 9,1 zwischen 2006 und 2015.....	149
Abbildung 113: Sohltopographie der Krückau bei km 9,2 zwischen 2006 und 2015.....	150
Abbildung 114: Abschnittsweise gemittelte Sohlhöhenänderungen im Unterlauf der Krückau im Messzeitraum Nov 2006 – Nov 2015.....	151

Abbildung 115: Abschnittsweise gemittelte Sohlhöhenänderungen im Unterlauf der Krückau sowie die mittlere Schwebstoffkonzentration in der Elbe (Dauermessstation D2, Sohle, Daten: WSV).....	152
Abbildung 116: Streudiagramm der mittleren jährlichen Schwebstoffkonzentration in der Elbe (Daten WSV) und der mittleren jährlichen Sohländerung in der Krückau .....	153
Abbildung 117: Abschnittsweise gemittelte Sohlhöhenänderungen im Unterlauf der Krückau sowie der mittlerer Jahresabfluss am Pegel A23 (Abflussdaten: LKN-SH) .....	154
Abbildung 118: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen 2051 – 2100 gegenüber 1951 – 2000 für das REMO A1B – Ensemble und Werte der einzelnen Simulationen des Ensembles für die Gebietsmittel der Einzugsgebiete von Este und Krückau.....	163
Abbildung 119: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Änderung von Tagen mit $N > 20$ mm, 2051 – 2100 gegenüber 1951 – 2000 für das REMO A1B – Ensemble und Werte der einzelnen Simulationen des Ensembles für die Gebietsmittel der Einzugsgebiete von Este und Krückau .....	164
Abbildung 120: Beobachtete und projizierte Änderung des MSL gegenüber 1990. Die blauen Kreise mit den vertikalen Linien stellen die Projektionen für den regionalen Anstieg bis 2020, 2050 und 2080 dar. Die graue Fläche umfasst den Bereich zwischen der 5% und der 95% Perzentile der Projektionen des IPCC. Die rote Linie stellt den dazugehörigen Median dar (aus Weisse et al. 2014) .....	165
Abbildung 121: Differenz des mittleren Tidehochwassers (durchgezogen) und Tideniedrigwassers (gestrichelt) zwischen Ist-Zustand und MSL-Szenario entlang der Fahrrinne der Unterelbe, QOW = $350 \text{ m}^3/\text{s}$ (in Anlehnung an (Seiffert et al. 2014)).....	167
Abbildung 122: Einfluss des Meeresspiegelanstiegs und Binnenzuflusses auf Sturmflutwasserstände der Sturmflutcharakteristik SF76 entlang des Elbe-Ästuars (Schulte-Rentrop und Rudolph 2011) ...	168
Abbildung 123: Saisonale Mittelwerte von gemessenen und simulierten Abflüssen am Pegel Emmen/Este .....	169
Abbildung 124: Saisonale Mittelwerte von gemessenen und simulierten Abflüssen am Pegel A23/Krückau .....	170
Abbildung 125: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Abflussänderungen an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau für den Zeitraum 2051 - 2100 gegenüber 1951 - 2000 sowie Werte der einzelnen Simulationen .....	171
Abbildung 126: Häufigkeiten von gemessenen und simulierten Abflüssen am Pegel Emmen/Este...	172
Abbildung 127: Häufigkeiten von gemessenen und simulierten Abflüssen am Pegel A23/Este.....	172
Abbildung 128: Simulierte Änderungen (2051 – 2100 gegenüber 1951 - 2000) der Dauerlinien des Abflusses an den Pegeln Emmen/Este und A23/Krückau für den Winter (a), (b) den Sommer (c), (d) und das gesamte Jahr (e), (f) .....	174
Abbildung 129: Jahresmaxima der simulierten Abflüsse am Pegel Emmen (Remo 2, 1951 – 2100). 175	

Abbildung 130: Simulierte Niederschlagshöhen (REMO2) im Einzugsgebiet der Este (Daten: CSC) .....	176
Abbildung 131: Auswirkungen der Entfernung von Ausreißern aus den Stichproben auf die Änderungen (2051-2100 ⇔ 1951-2000) ausgewählter statistischer Abflussereignisse am Pegel Emmen (Extremwertverteilung: GEV) .....	178
Abbildung 132: Abflüsse definierter Wiederkehrintervalle von gemessenen und simulierten Daten für den Pegel Emmen/Este .....	178
Abbildung 133: Abflüsse definierter Wiederkehrintervalle von gemessenen und simulierten Daten für den Pegel A23/Krückau .....	179
Abbildung 134: Bandbreiten der Abflussänderungen und Einzelwerte der Szenarien ausgewählter Wiederkehrintervalle für den Pegel Emmen/Este .....	179
Abbildung 135: Bandbreiten der Abflussänderungen und Einzelwerte der Szenarien ausgewählter Wiederkehrintervalle für den Pegel A23/Krückau .....	180
Abbildung 136: Durchschnittliche Anzahl der Schließungen pro Jahr für den Ist-Zustand (1980-2014) und für angenommene Anstiege des MSL .....	183
Abbildung 137: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Este bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation des mittleren Meeresspiegels (MSL) am unteren Modellrand (Simulationszeitraum 17.07.2014 - 31.07.2014) .....	185
Abbildung 138: Residuelle Schwebstofftransportraten im Unterlauf der Krückau bei mittleren Tide- und Abflussverhältnissen unter Variation des mittleren Meeresspiegels (MSL) am unteren Modellrand (Simulationszeitraum 17.07.2014 - 31.07.2014) .....	186

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wasserwirtschaftliche Aufgaben und Zuständigkeiten an der Este .....	5
Tabelle 2: Modellierete Bauwerke in Este und Krückau.....	28
Tabelle 3: Baumaßnahmen in und an der Unterelbe zur Sicherung des Siedlungs- und des landwirtschaftlich genutzten Raumes (aus Kappenberg und Fanger 2007, ergänzt nach Siefert 1998, Eichweber 2005 und IKSE 2005).....	39
Tabelle 4: Baumaßnahmen in der Unterelbe zur Verbesserung der Schiffbarkeit (aus Kappenberg und Fanger 2007, ergänzt nach Rohde, Siefert 1998, Eichweber 2005 und IKSE 2005).....	41
Tabelle 5: Morphologische Merkmale der Unterelbe, unterteilt in Untersuchungsabschnitte in Anlehnung an (WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority 2012a), ergänzt nach (Boehlich und Strotmann 2008) und (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2014).....	54
Tabelle 6: Zusammenfassung ausgewählter morphologischer und hydrologischer Rahmenbedingungen in der Unterelbe auf Höhe der Einmündungen der tidebeeinflussten Nebenflüsse .....	63
Tabelle 7: Hydrologische Grunddaten der Nebenflüsse der Tideelbe (in Anlehnung an IKSE 2005, ergänzt nach (Bergemann und Böhme 2011)).....	65
Tabelle 8: Übersicht über Sperrwerke und Deichlängen an Nebenflüssen der unteren Tideelbe (Daten: WSV, LKN SH, NLWKN).....	69
Tabelle 9: Morphologische Parameter ausgewählter Nebenflüsse .....	76
Tabelle 10: Mittlere Tiefen- und Breitenkonvergenz ausgewählter Nebenflüsse zwischen dem jeweiligen normierten Gewässer km 0,2 und der Mündung.....	79
Tabelle 11: Bereiche charakteristischer Korngrößen im Unterlauf von Krückau und Este.....	80
Tabelle 12: Pegelstammdaten und Niederschlag für ausgewählte Nebenfluss-Pegel stromauf der Tidegrenze (Daten: FFH und HPA 1990-2014, LLUR Flintbek, NLWKN Stade).....	85
Tabelle 13: Abflüsse ausgewählter Wiederkehrintervalle für die Pegel Emmen/Este und A23/Krückau, Verteilungsfunktion GEV .....	92
Tabelle 14: Hydrologische Grunddaten zur Entwässerung an den Unterläufen ausgewählter Nebenflüsse (Zusammenstellung Stadelmann 2010 und Angaben der Entwässerungsverbände)..	93
Tabelle 15: Randbedingungen bei der Simulation des Binnenwasserstands während der ausgewählten Lastfälle .....	107
Tabelle 16: Transferfunktionen zur Übertragung des Tnw am Pegel Cuxhaven auf die Pegel Kollmar und Cranz, Zeitraum 01.11.1980 – 31.10.2011 .....	109

Tabelle 17: Wiederkehrintervall der Tnw-Mindesthöhe im Lastfall A (HQ <sub>5</sub> plus 60% Schöpfwerksleistung, ein gesperrtes Tnw) .....	116
Tabelle 18: Wiederkehrintervall der Tnw – Kette, die die Kriterien des ausgewählten Lastfalls (HQ <sub>5</sub> plus 60% Schöpfwerksleistung bei zwei gesperrten Tnw) erfüllt .....	119
Tabelle 19: Wiederkehrintervalle der Lastfälle A und B .....	119
Tabelle 20: Mittlere sohnnahe Schwebstoffkonzentration in der Elbe während der Messkampagnen in Este und Krückau (Daten: WSV).....	121
Tabelle 21: Gegenüberstellung wesentlicher morphodynamischer Kenngrößen der Unterläufe von Este und Krückau bei mittleren Verhältnissen (MQ, mittlere Tideverhältnisse), ermittelt auf der Grundlage von Modellergebnissen .....	134
Tabelle 22: Trends in der Sohlentwicklung an ausgewählten Nebenflüssen der Tideelbe gegenüber dem Referenzzustand von Beginn der Ausbaumaßnahmen in der Unter- und Außenelbe in 1999/2000. aus (WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority 2012a, 2012b).....	145
Tabelle 23: Kombinierte Wiederkehrintervalle der Lastfälle A und B .....	155
Tabelle 24: Zusammenfassung der Erkenntnisse zur morphologischen Entwicklung der Sohlhöhen im Unterlauf der Krückau .....	158
Tabelle 25: Berechnete Änderungen der mittleren Temperaturen in der westlichen Metropolregion Hamburg gegenüber 1971 – 2000 (nach Rechid et al. 2014).....	162
Tabelle 26: Berechnete Änderungen der mittleren Niederschlagsmenge in der westlichen Metropolregion Hamburg gegenüber 1971 – 2000 (nach Rechid et al. 2014).....	162
Tabelle 27: Untersuchte Varianten zum Umgang mit Ausreißern .....	177
Tabelle 28: Simulierte Wasserstände am Binnenpegel des Äußeren Este-Sperrwerks, 9,0 h und 21,5 h nach Beginn der Sperrung.....	181
Tabelle 29: Simulierte Wasserstände am Binnenpegel des Krückau-Sperrwerks, 9,0 h und 21,5 h nach Beginn der Sperrung.....	181
Tabelle 30: Wiederkehrintervalle des Lastfalls A (HQ <sub>5</sub> , ein gesperrtes Tnw) an der Este unter Annahme ausgewählter Szenarien zum Meeresspiegelanstieg und zum Anstieg des Binnenabflusses .....	182
Tabelle 31: Wiederkehrintervalle des Lastfalls A (HQ <sub>5</sub> , ein gesperrtes Tnw) an der Krückau unter Annahme ausgewählter Szenarien zum Meeresspiegelanstieg und zum Anstieg des Binnenabflusses .....	182

---

Tabelle 32: Wiederkehrintervalle des Lastfalls B (HQ5, zwei gesperrte Tnw in Folge) an der Este unter Annahme ausgewählter Szenarien zum Meeresspiegelanstieg und zum Anstieg des Binnenabflusses.....	182
Tabelle 33: Wiederkehrintervalle des Lastfalls B (HQ5, zwei gesperrte Tnw in Folge) an der Krückau unter Annahme ausgewählter Szenarien zum Meeresspiegelanstieg und zum Anstieg des Binnenabflusses.....	182
Tabelle 34: Im Rahmen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung angesetzte äquivalente Sandrauheiten ( $k_s$ -Wert).....	200
Tabelle 35: : Im Rahmen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung angesetzte Parameter zu Beschreibung der Eigenschaften der Sedimente und Schwebstoffe .....	201
Tabelle 36: Korngrößen im Unterlauf der Este .....	202

## Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
$A$	mm	Mittlere Abflusshöhe
$A_E$	km <sup>2</sup>	Größe Einzugsgebiet
$\beta_{ero}$	-	Erodibilitätsfaktor
$C$	g/l	Schwebstoffkonzentration
$C_1$	g/l	untere Grenzkonzentration
$C_2$	g/l	obere Grenzkonzentration
$D_x, D_y$	m <sup>2</sup> /s	Effektiver Diffusionskoeffizient in x- und y- Richtung
$\Delta S$	mm	Speicherung oder Verbrauch von Wasser im Einzugsgebiet
$exp2$	-	empirischer Exponent zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten
$h_B$	m	Basishöhe zur Abgrenzung von Tnw – Folgen
$k$	mm/s	empirischer Koeffizient zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit = 0,6 bis 225,6
$l_T$	km	Länge des tidebeeinflussten Abschnitts
$l_{ges}$	km	Gesamtlänge eines Flusses
$m$	-	empirischer Exponent zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit: 0,47 – 2 ((Malcherek 2007) und 1,33 (Krone 1962))
$n$	-	Anzahl
$n_{por}$	-	Porosität
$N$	mm	Jahresniederschlag
$q_{nom}$	m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup>	Flächenspezifische nominelle Förderleistung
$q$	l/s/km <sup>2</sup>	Abflussspende
$Q_{nom}$	m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup>	Nominelle Förderleistung
$S_{dep}$	kg/m <sup>2</sup> /s	Depositionsrate
$S_{ero}$	kg/m <sup>2</sup> /s	Erosionsrate
$\tau_{c,dep}$	N/m <sup>2</sup>	Kritische Depositionsschubspannung
$\tau_{c,ero}$	N/m <sup>2</sup>	Kritische Erosionsschubspannung
$u$	m/s	Fließgeschwindigkeit in x-Richtung
$v$	m/s	Fließgeschwindigkeit in y-Richtung
$v_{max,ebb}$	m/s	Maximale Ebbstromgeschwindigkeit
$v_{max,flut}$	m/s	Maximale Flutstromgeschwindigkeit
$V$	mm	Verdunstung
$w$	m/s	Fließgeschwindigkeit in z-Richtung
$w_s$	m/s	Sinkgeschwindigkeit
$w_{s1}$	m/s	minimale Sinkgeschwindigkeit bis zur Konzentration $C_1$
$w_{s2}$	m/s	minimale Sinkgeschwindigkeit bis zur Konzentration $C_2$

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Vollständige Bezeichnung</b>
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BFG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
CSC	Climate Service Center
DGPS	Differential Global Positioning System
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU-HWRM-RL	Europäische Hochwasserrisikomanagementrichtlinie
EU-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
EZG	Einzugsgebiet
FHH	Freie und Hansestadt Hamburg
GPS	Global Positioning System
HQ	Hochwasserabfluss
HQ <sub>n</sub>	Hochwasserabfluss mit einer Jährlichkeit n
IHO	International Hydrographic Organization
LKN-SH	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein
m ü. NHN	Meter über Normalhöhennull
MHQ	Mittlerer Hochwasserabfluss
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss
MQ	Mittlerer Abfluss
MThw	Mittleres Tidehochwasser
MTnw	Mittleres Tideniedrigwasser
MThb	Mittlerer Tidehub
MSL	Mean Sea Level
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
OBS	Optical BackScatter
Thb	Tidehub
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

## Literaturverzeichnis

- AG Niederungen 2050 (2014): Grundlagen für die Ableitungen von Anpassungsstrategien in Niederungsgebieten an den Klimawandel. Abschlussbericht. Hg. v. Arbeitsgruppe Niederungen 2050 unterstützt durch den Marschenverband Schleswig-Holstein e.V.
- Albers, Thorsten (2012): Messung und Analyse morphologischer Änderungen von Ästuarwatten. Untersuchungen im Neufelder Watt in der Elbmündung. Dissertation. Hamburg: TuTech-Verlag (Hamburger Wasserbau-Schriften, 15).
- Amt für ländliche Räume Husum (2007): Betriebsordnung für das Sturmflutsperrwerk in der Krückau. Husum.
- Ariathurai, Chita Ranjan (1974): A finite element model for sediment transport in estuaries. PhD thesis. Davis: University of California.
- Ariathurai, Ranjan; MacArthur, Robert C.; Krone, Ray B. (1977): Mathematical model of estuarial sediment transport. Final report (Technical report, D-77-12).
- Barnett, Vic; Lewis, Tobias; Lewis, Toby (1978): Outliers in statistical data. Chichester u.a: Wiley (Wiley series in probability and mathematical statistics).
- Battisto, G. M.; Friedrichs, C. T.; Miller, H.C. and Resio, D.T. (1999): Response of OBS to mixed grain size suspensions during Sandy Duck'97. In: Nicholas C. Kraus und William G. MacDougal (Hg.): Coastal sediments '99. Proceedings of the 4th International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes; conference theme: scales of coastal sediment motion and geomorphic change; Hauppauge, Long Island, New York, June 21 - 23, 1999. International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes; American Society of Civil Engineers. Reston, Va: American Society of Civil Engineers, S. 297–312.
- BAW (2011a): BAW Kolloquium - Untersuchungen zur Minderung von Sediment- und Schwebstoffmengen in den Seeschifffahrtsstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter [http://vzb.baw.de/publikationen/kolloquien/0/Programm\\_22\\_09\\_2011-2.pdf](http://vzb.baw.de/publikationen/kolloquien/0/Programm_22_09_2011-2.pdf), zuletzt geprüft am 02.10.2015.
- BAW (2011b): Untersuchungen der BAW zum Strombau- und Sedimentmanagementkonzept. Grundlagen zur Evaluation des Konzeptes durch externe Experten. Unter Mitarbeit von H. Weilbeer, A. Paesler, B. Fricke, M. Klöpfer und C. Maerker. In: BAW Kolloquium - Untersuchungen zur Minderung von Sediment- und Schwebstoffmengen in den Seeschifffahrtsstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter [http://vzb.baw.de/publikationen/kolloquien/0/HW\\_Kolloquium\\_22092011.pdf](http://vzb.baw.de/publikationen/kolloquien/0/HW_Kolloquium_22092011.pdf), zuletzt geprüft am 02.10.2015.
- Belger, G.; Haase, M.; Jung, T.; Lippert, K. (2009): Kalypso Open Source - A GIS-based Platform for Environmental and Water Resources Modeling. In: GeoInformatics. Magazine for surveying, mapping & GIS professionals, Bd. 12. Emmeloord, S. 36–39.

- Bergemann, Michael (2004): Die Trübungszone in der Tideelbe. Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung. interner Kurzbericht der ARGE Elbe. Online verfügbar unter [http://www.fgg-elbe.de/dokumente/fachberichte.html?file=tl\\_files/Download-Archive/Fachberichte/Physikalisch\\_chemische\\_Qualitaetskomponenten/04Truebungsz.pdf](http://www.fgg-elbe.de/dokumente/fachberichte.html?file=tl_files/Download-Archive/Fachberichte/Physikalisch_chemische_Qualitaetskomponenten/04Truebungsz.pdf).
- Bergemann, Michael; Böhme, Michael (2011): Gesamtliste der Fließgewässer im Elbeeinzugsgebiet. Hamburg. Online verfügbar unter [http://www.fgg-elbe.de/dokumente/fachberichte.html?file=tl\\_files/Download-Archive/Fachberichte/Allgemein/Fliessgw.pdf](http://www.fgg-elbe.de/dokumente/fachberichte.html?file=tl_files/Download-Archive/Fachberichte/Allgemein/Fliessgw.pdf).
- Berichtsportal WasserBLiCk/BFG (2009): Ökologischer Zustand/ ökologisches Potential der Fließgewässerkörper in Deutschland. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2\\_karte\\_oekolog-zustand\\_2015-05-06\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_karte_oekolog-zustand_2015-05-06_0.pdf), zuletzt aktualisiert am 06.05.2015, zuletzt geprüft am 15.02.2016.
- BFG (2008): WSV-Sedimentmanagement Tideelbe, Strategien und Potenziale. Eine Systemstudie ; ökologische Auswirkungen der Umlagerung von Wedeler Baggergut. Stand: 30.06.2008. Koblenz: BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde Bericht, 1584).
- BFG (2014): Sedimentmanagement Tideelbe, Strategien und Potenziale - Systemstudie II. Ökologische Auswirkungen der Unterbringung von Feinmaterial ; Endbericht. [Stand:] 27.03.2014. Koblenz: BfG (Bericht / Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1763).
- Boehlich, Marcus J.; Strotmann, Thomas (2008): The Elbe Estuary. In: *Die Küste* (74), S. 288–306.
- Boon, John D.; Byrne, Robert J. (1981): On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. Gloucester Point, Va: Virginia Institute of Marine Science.
- BUE (2015): Information der Öffentlichkeit gemäß § 79 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) über die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (Richtlinie 2007/60/EG) in der Flussgebietsgemeinschaft Elbe. Hintergrunddokument der Freien und Hansestadt Hamburg zum Hochwasserrisikomanagementplan der Flussgebietsgemeinschaft Elbe. Freie und Hansestadt Hamburg. Online verfügbar unter <http://www.hamburg.de/contentblob/4653328/data/d-3-hintergrunddokument-hwrm-plan.pdf>.
- Burchard, H.; Baumert, H. (1998): The formation of estuarine turbidity maxima due to density effects in the salt wedge. A hydrodynamic process study. In: *JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY* (28), S. 309–321. Online verfügbar unter [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0485\(1998\)028%3C0309%3ATFOETM%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0485(1998)028%3C0309%3ATFOETM%3E2.0.CO%3B2), zuletzt geprüft am 19.10.2015.
- BWK (1999): Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern. Düsseldorf: BWK (BWK-Merkblatt, 1999,1).

- BWS GmbH (2015): Verbesserung des Hochwasserschutzes an der Este im Innenstadtbereich von Buxtehude. Hydraulische Berechnungen. Online verfügbar unter [http://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/97652/Hydraulische\\_Berechnungen\\_Erlaeuterungsbericht.pdf](http://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/97652/Hydraulische_Berechnungen_Erlaeuterungsbericht.pdf).
- Cameron, W. M.; Pritchard, D. W. (1963): Estuaries. In: Maurice Neville Hill (Hg.): The Sea. The composition of sea-water comparative and descriptive oceanography, Bd. 2. Cambridge: Mass.; Harvard university press (The global coastal ocean, 2), S. 306–324.
- Christensen, J.; Hewitson, B.; Busuioc, A.; Chen, A.; Gao, X.; Held, I. et al. (2007a): Regional climate projection. In: S. Solomon, D. Qin, Manning M., Z.Chen, M. Marquis, K.B. Averyt et al. (Hg.): Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge Univ. Press (Climate change 2007, 1).
- Christensen, Jens H.; Carter, Timothy R.; Rummukainen, Markku; Amanatidis, Georgios (2007b): Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. In: *Climatic Change* 81 (S1), S. 1–6. DOI: 10.1007/s10584-006-9211-6.
- Clyde, Merlise; George, Edward I. (2004): Model Uncertainty. In: *Statist. Sci.* 19 (1), S. 81–94. DOI: 10.1214/088342304000000035.
- Dalrymple, Robert W.; Zaitlin, B. A.; Boyd, R. (1992): A conceptual model for estuarine sedimentation. In: *Journal of sedimentary petrology*, Bd. 62. Tulsa: Society of Economic Paleontologists & Mineralogists, S. 1130–1146.
- Dammschneider, Hans-Joachim (1983): Morphodynamik, Materialbilanz und Tidewassermenge der Unterelbe. Berlin.
- Davies, John L. (1977): Geographical variation in coastal development. 2. impression. Hg. v. Keith M. Clayton. New York: Longman (Geomorphology texts, 4).
- Davis, Richard A. (1985): Coastal Sedimentary Environments. Second rev., Expanded edition. New York, NY: Springer New York.
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Bonn: Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser (DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 251).
- Deutschland; Planungsgruppe Ökologie + Umwelt Nord (1997): UVU zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Aussenelbe an die Containerschifffahrt. [Stand:] August 1997. Hamburg (Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Aussenelbe an die Containerschifffahrt Umweltverträglichkeitsstudie, ; Erg.-Bd).
- DIN 4049, Teil 3 (1994): Hydrologie. Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Oktober 1994. Berlin: Beuth (Deutsche Norm, 4049,3).

- Donner, Monika (2014): Zur Langzeitsimulation der morphodynamischen Entwicklung tidebeeinflusster Marschgewässer. Techn. Univ., Institut für Wasserbau, Diss.--Hamburg-Harburg, 2014. 1. Aufl. Hamburg: TuTech Verl (Hamburger Wasserbau-Schriften, 16).
- Dronkers, J. (1986): Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology. In: Netherlands journal of sea research. NJSR, Bd. 20, S. 117–131.
- Dronkers, J. J.; van Leussen, Wim (1988): Physical processes in estuaries. Berlin, New York: Springer-Verlag.
- DVWK (1991): Ökologische Aspekte zu Altgewässern. DK 627.4 Altwasser ; DK 574 Ökologie. Bonn (DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 219).
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Hennef: DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser u. Abfall (DWA-Regelwerk : Merkblatt, DWA-M 552).
- Dyck, Siegfried (1980): Angewandte Hydrologie. 2., völlig überarb. Aufl. Berlin, München, Düsseldorf: Ernst.
- Dyer, K. R. (1989): Sediment Processes in Estuaries: Future Research Requirements.
- Eichweber, Günther (2005): Hydromorphologie der Elbeästuars. unveröffentlichtes Papier. Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Nord. Online verfügbar unter [http://www.tideelbe.de/files/04\\_hydromorphologie-wsd-n\\_2005-04-26.pdf](http://www.tideelbe.de/files/04_hydromorphologie-wsd-n_2005-04-26.pdf), zuletzt geprüft am 15.04.2015.
- Eisma, Doeke (Hg.) (1998): Intertidal deposits. River mouths, tidal flats, and coastal lagoons. Chemical Rubber Company. Boca Raton, Fla: CRC Press (Marine science series).
- Engelen, G. B.; Kloosterman, F. H. (1996): Hydrological systems analysis. Methods and applications. Dordrecht: Kluwer (Water science and technology library, 20).
- Entelmann, Ingo; Gätje, Bettina (2012): Sedimentmanagement in der Tideelbe - Optimierung von Umlagerungsstrategien. In: Magdeburger Gewässerschutzseminar 2012. Magdeburský seminář o ochraně vod 2012 : 10. und 11. Oktober 2012 in Hamburg ; die Elbe und ihre Sedimente - Tagungsband. International Commission for the Protection of the Elbe; Magdeburger Gewässerschutzseminar. Magdeburg, Halle, Saale: Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt, S. 63–66. Online verfügbar unter <http://digital.bibliothek.uni-halle.de/pe/download/pdf/2256105?originalFilename=true>.
- FFH; HPA (Hg.) (1990-2014): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - DGJ - Elbe Teil III (unteres Elbegebiet). Freie und Hansestadt Hamburg; HPA Hamburg Port Authority AöR. Hamburg.
- Fischer, Hugo B. (1979): Mixing in inland and coastal waters. New York: Academic Press. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/els031/78022524.html>.

- Fleming, George (2002): Flood risk management. Learning to live with rivers. London: Thomas Telford.
- Freie und Hansestadt Hamburg, Hamburg Port Authority (2012): Deutsches gewässerkundliches Jahrbuch. Elbegebiet, Teil III. Hamburg.
- Freitag, Caroline; Hochfeld, Boris; Ohle, Nino (2007): Lebensraum Tideelbe. In: Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement : Beiträge der 25. Jahrestagung des Arbeitskreises "Geographie der Meere und Küsten" 26.-28.4.2007 in Hamburg. Rostock: EUCC - Die Küsten Union Deutschland, S. 69–79.
- Fröhle, Peter; Nehlsen, Edgar (2013): Überprüfung der Schließordnung des Inneren Estersperrwerks. Endbericht. Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Gätjen, Burchard (1977): Die Sturmflutsperrwerke an der deutschen Nordseeküste. Aufgaben, Planung und Bau. In: *Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft* 36 (1977/1978), S. 179–226.
- Gesellschaft für Schleswig-Holsteinische Geschichte (2015): Entwässerung. Online verfügbar unter <http://www.geschichte-s-h.de/entwaesserung/>, zuletzt geprüft am 11.12.2015.
- Golder Associates (2011): Hydraulische Simulation - Fahrrinnenanpassung an der Unter- und Außenelbe. Wirkung von Ausgleichsmaßnahmen auf das Abflussverhalten der Stör. Online verfügbar unter [https://www.kuestendaten.de/publikationen/Datencontainer/Einzeldokumente/Bericht\\_Hydraulik\\_Ausgleichsmaßnahmen\\_Stoer\\_10505300816\\_2011\\_05\\_05\\_komplett.pdf](https://www.kuestendaten.de/publikationen/Datencontainer/Einzeldokumente/Bericht_Hydraulik_Ausgleichsmaßnahmen_Stoer_10505300816_2011_05_05_komplett.pdf).
- Gönnert, Gabriele; Gerkenmeier, Birgit; Müller, Jan-Moritz; Sossidi, Kristina; Thumm, Sigrid (2010): Zur hydrodynamischen Interaktion zwischen den Sturmflutkomponenten Windstau, Tide und Fernwelle. XtremeRisk, Zwischenbericht Teilprojekt 1a.
- Gönnert, Gabriele; Siefert, Winfried (1998): Sturmflutatlant Cuxhaven. [Hamburg]: Strom- und Hafentbau (Studie / Strom- und Hafentbau [Hamburg], Strombau/Hydrologie <24>, Nr. 91).
- Görgens, Matthias (2011): Betriebsvergleich 2009/2010. In: Mitteilungen des Obstbauversuchsringes des Alten Landes e.V. an der ESTEBURG Obstbauzentrum Jork, Bd. 66. Jork: Obstbauversuchsring des Alten Landes, S. 210–217.
- Gourley, Jonathan J.; Vieux, Baxter E. (2006): A method for identifying sources of model uncertainty in rainfall-runoff simulations. In: *Journal of Hydrology* 327 (1-2), S. 68–80. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.11.036.
- Habersack, Helmut (2008): Schwebstoffe im Fließgewässer. Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes. Wien: BMLFUW.
- Hayes, M. O. (1975): Morphology of sand accumulation in estuaries. In: L. Eugene Cronin (Hg.): Estuarine research. 2. geology and engineering. New York: Academic Press, S. 3–22.

- Hayter, E. J.; Mehta, A. J. (1986): Modelling cohesive sediment transport in estuarial waters. In: *Applied Mathematical Modelling* 10 (4), S. 294–303. DOI: 10.1016/0307-904X(86)90061-2.
- Heinrich, Gert (2007): Allgemeine Systemanalyse. München, Wien: Oldenbourg (Lehrbuch kompakt).
- Hellmers, S.; Manojlović, N.; Palmaricciotti, G.; Kurzbach, S.; Fröhle, P. (2015): Multiple linked sustainable drainage systems in hydrological modelling for urban drainage and flood risk management. In: *J. Flood Risk Manage*, S. n/a. DOI: 10.1111/jfr3.12146.
- Hellmers, Sandra; Nehlsen, Edgar; Oberhofer, Josef (2016): Das N-A-Modell KalypsoHydrology - Grundlagen. In: Peter Fröhle (Hg.): Modelle und Modellierung. TU Hamburg-Harburg., Institut für Wasserbau, Bd. 21. Hamburg: TuTech-Verl (Hamburger Wasserbau-Schriften, 21).
- Hofmeister, Adolf E. (1979): Besiedlung und Verfassung der Stader Elbmarschen im Mittelalter I. Die Stader Elbmarschen vor der Kolonisation des 12. Jahrhundert, 1979 II. Die Hollerkolonisation und die Landesgemeinden Land Kehdingen und Altes Land, 1981. Hildesheim: Lax (Veröffentlichungen des Instituts für historische Landesforschung der Universität Göttingen, 12).
- Holzwarth, Ingrid; Schulte-Rentrop, Annette; Hesser, Fred (2011): Auswirkungen klimabedingter Änderungen auf das Strömungs- und Transportverhalten deutscher Nordseeästuare. Ein Vergleich von Ems, Jade-Weser und Elbe. In: Tagungsband HTG-Kongress. Würzburg, 07.-09.09.2011, S. 275–282. Online verfügbar unter <http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2011/11719/>.
- HPA (2014): Containerumschlag im Hamburger Hafen von 2009 bis 2014 (in Millionen TEU). Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/29789/umfrage/containerumschlag-im-hamburger-hafen/>, zuletzt geprüft am 15.04.2015.
- IKSE (2005): Die Elbe und ihr deutsches Einzugsgebiet. Bestandsaufnahme und Erstbewertung. Flussgebietsgemeinschaft Elbe. Kiel. Online verfügbar unter <http://fgg-elbe.de/pdf/broschuere.pdf>.
- International Hydrographic Organization (2008): IHO Standards for Hydrographic Surveys. 5. Aufl. International Hydrographic Organization. Monaco (Special Publication, 44).
- IPCC (2007): Summary for Policymakers IPCC Fourth Assessment Report, WorkingGroup III. Berkeley, Calif, Oak Ridge, Tenn: Lawrence Berkeley National Laboratory; Distributed by the Office of Scientific and Technical Information, U.S. Dept. of Energy.
- Jacob, D. (2001): A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. In: *Meteorol. Atmos. Phys.* 77 (1-4), S. 61–73. DOI: 10.1007/s007030170017.
- Jacob, D.; Nilson, E.; Bülow, K. (2009): REMO climate of the 20th century run. BFG Project, World Data Center for Climate.

- Jacob, D.; Podzun, R. (1997): Sensitivity studies with the regional climate model REMO. In: *Meteorol. Atmos. Phys.* 63 (1-2), S. 119–129. DOI: 10.1007/BF01025368.
- Jacob, Daniela; Göttel, Holger; Kotlarski, Sven; Lorenz, Philip; Sieck, Kevin (2008): *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland: Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Climate change, 2008,11).
- Jacob, D.; Bülow, K.; Kotova, L.; Moseley, C.; Petersen, J.; Rechid, D. (2012): *Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble Simulationen für die Klimafolgenforschung*. CSC Report 6, Climate Service Center Hamburg.
- Jay, D. A.; Musiak, J. D. (1994): Particle trapping in estuarine tidal flows. In: *J. Geophys. Res.* 99 (20), S. 445–461. Online verfügbar unter [http://pdxscholar.library.pdx.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=cengin\\_fac](http://pdxscholar.library.pdx.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=cengin_fac), zuletzt geprüft am 19.10.2015.
- Jensen, J. (2012): 50 Jahre nach der Hamburg-Flut - Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in Hamburg im historischen und aktuellen Kontext. In: Christoph Ohlig (Hg.): *DWhG - Zehn Jahre wasserhistorische Forschungen und Berichte*. Norderstedt: Books on Demand (Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft, Bd. 20, T. 2), S. 531–542.
- Jensen, Jürgen; Frank, Torsten; Wahl, Thomas; Dangendorf, Sönke (2011): *KFKI-Projekt AMSeL. Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste*. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen. Siegen. Online verfügbar unter [http://www.bau.uni-siegen.de/fwu/wb/forschung/projekte/amsel/amsel\\_kfki\\_bericht\\_abschlussbericht\\_gesamt.pdf](http://www.bau.uni-siegen.de/fwu/wb/forschung/projekte/amsel/amsel_kfki_bericht_abschlussbericht_gesamt.pdf).
- Jensen, Wilhelm (1916): Sächsische und holländische Siedlungen in der Wilstermarsch. In: *Zeitschrift der Gesellschaft für Schleswig-Holsteinische Geschichte* 46 (1916), S. 41–52.
- Jorzick, Hans-Peter; Ferger-Gerlach, Imme; Janus, Klaus; Jorzick, Gisela (1989): *Hamburg und sein Umland in Karte und Luftbild. Eine Landeskunde*. Neumünster: Wachholtz.
- Kappenberg, Jens; Fanger, Hans-Ulrich (2007): *Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee*. Als Ms. vervielfältigt. Geesthacht: GKSS-Forschungszentrum (GKSS, 2007,20).
- Karstens, Gustav (1982): Zur Geschichte der Entwässerung in Sachsenbande und Neuendorf. In: Klaus-Joachim Lorenzen-Schmidt (Hg.): *Archiv für Agrargeschichte der holsteinischen Elbmarschen*. Krempe: Archiv für Agrargeschichte der holsteinischen Elbmarschen, S. 97–143.
- Katsman, Caroline A.; Sterl, A.; Beersma, J. J.; Brink, H. W.; Church, J. A.; Hazeleger, W. et al. (2011): Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection

- strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example. In: *Climatic change : an interdisciplinary, intern. journal devoted to the description, causes and implications of climatic change* 109 (3/4), S. 617–645.
- Ketchum, Bostwick H.; Rawn, A. M. (1951): The Flushing of Tidal Estuaries [with Discussion]. In: *Sewage and Industrial Wastes* 23 (2), S. p 198-209. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/25031530>.
- King, Ian P. (2006): A Finite Element Model for Stratified Flow and Cohesive Sediment/Sand Transport. RMA - RMA-10S User Guide, Version 3.5D. Resource Modelling Associates. Sydney.
- King, Ian P.; Roig, L. (1988): Two-dimensional finite element models for floodplains and Two-dimensional finite element models for floodplains and tidal flats. In: Hiroshi Niki und Mutsuto Kawahara (Hg.): *Computational methods in flow analysis. Proceedings of the International Conference on Computational Method in Flow Analysis held at Okayama, on September 5-8, 1988*. Okayama: Okayama University of Science, S. 711–718.
- Knapp, F. H. (1963): *Ausfluss, Überfall und Durchfluss im Wasserbau. Eine angewandte Hydraulik auf physikalischer Grundlage*. Karlsruhe: Verlag G. Braun.
- Kopmann, Rebekka; Henschel, Bernd; Kampker, Anne (2004): Vorhersagefehler von hydraulisch-numerischer Modellierung vor dem Hintergrund unsicherer Naturdaten und deren Konsequenz. In: *Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen - Risks in Design and Management of Rivers and Reservoirs*. Dresden: Inst. für Wasserbau und Techn. Hydromechanik (Dresdner wasserbauliche Mitteilungen, Heft 27), S. 259–270. Online verfügbar unter [http://vzb.baw.de/publikationen/dresdner-wasserbauliche-mitteilungen/0/26\\_Heft\\_27\\_Vorhersagefehler\\_von\\_hydraulisch\\_numerischer\\_Modellierung.pdf](http://vzb.baw.de/publikationen/dresdner-wasserbauliche-mitteilungen/0/26_Heft_27_Vorhersagefehler_von_hydraulisch_numerischer_Modellierung.pdf).
- Kösters, Frank (2010): Die Trübungszone der Weser. Prozessverständnis und Überblick aktueller Untersuchungen. In: *BAW Kolloquium am 07.10.2010*. Online verfügbar unter [http://vzb.baw.de/publikationen/kolloquien/0/07-10-2010\\_Koesters.pdf](http://vzb.baw.de/publikationen/kolloquien/0/07-10-2010_Koesters.pdf), zuletzt geprüft am 20.10.2015.
- Krauß, Joseph; Berger, Martin (Hg.) (1961): *Navigation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Krone, R. (1978): Aggregation of Suspended particles in Estuaries. In: B. Kjerfve (Hg.): *Estuarine Transport Processes*. Columbia: USC-Press, S. 177–190.
- Krone, Ray B. (1962): Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes.
- Kuipers, J.; Vreugdenhil, C. B. (1973): Calculations of two-dimensional horizontal flow. Report on basic research. Delft (Report / Delft Hydraulics Laboratory S, 163,1).
- LfU (2004): *Hydraulik naturnaher Fließgewässer*. 1. Aufl., Nachdr. Mannheim: LfU c/o JVA Mannheim Druckerei (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, 75).

- Lindner, Klaus (1982): Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen. Braunschweig: Leichtweiss-Inst. für Wasserbau d. Techn. Univ (Mitteilungen / Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, H. 75).
- Lippert, K.; Jung, T.; Belger, G.; Haase, M.; Schrage, N. (2009): Kalypso: Ein Open Source Modellierungssystem für die Wasserwirtschaft. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.): Wasserstandsinformationsdienste der BfG für die Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 24. März 2009 in Koblenz. Koblenz: BfG (Veranstaltungen / bfg, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2009,1), S. 98–106.
- Lippert, Kaj (2005): Analyse von Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und ihre mathematische Formulierung für hydrodynamische Modelle. Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2004. Hamburg: Inst. f. Wasserbau TUHH (Hamburger Wasserbau-Schriften, 4).
- Lowe, J. A.; HOWARD, T. P.; PARDAENS, A.; TINKER, J.; HOLT, J.; WAKELIN, S. et al. (2009): UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections. Met Office Hadley Centre. Exeter, UK.
- Lowe, J. A. et. al. (2010): Past and future changes in extreme sea levels and waves. In: John A. Church, Philip L. Woodworth, Thorkild Aarup und W. Stanley Wilson (Hg.): Understanding Sea-level Rise and Variability.
- LSBG (2012): Sturmflutschutz in Hamburg. gestern - heute - morgen. Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer. Hamburg (Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer). Online verfügbar unter <http://lsbg.hamburg.de/contentblob/3281680/data/sturmflut-in-hamburg-1.pdf>.
- Malcherek, A. (2007): Sedimenttransport und Morphodynamik. Vorlesungsskript. Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen. Online verfügbar unter [https://www.unibw.de/ifw/HYDRO/skripte/4.-sedimenttransport-und-morphodynamik/at\\_download/file](https://www.unibw.de/ifw/HYDRO/skripte/4.-sedimenttransport-und-morphodynamik/at_download/file), zuletzt geprüft am 22.10.2015.
- Maniak, Ulrich (2001): Wasserwirtschaft. Einführung in die Bewertung wasserwirtschaftlicher Vorhaben. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-59510-3>.
- Maushake, Christian (2007): Untersuchungen zur Schwebstoffdynamik im Elbeästuar auf Basis von ADCP-Messungen. In: *Die Küste* 72 (1), S. 125–143.
- Meehl, G. A.; Stocker, T. F.; Collins, W. D.; Friedlingstein, P.; Gaye, A. T.; Gregory, J. M. et al. (2007): Global Climate Projections. In: S. Solomon, D. Qin, Manning M., Z.Chen, M. Marquis, K.B. Averyt et al. (Hg.): Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge Univ. Press (Climate change 2007, 1). Online verfügbar unter <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.
- MLUR (2011): Umsetzung der Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23.10.2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken in der

- FGE Elbe in Schleswig-Holstein. Vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos und Bestimmung der Gebiete mit potentiell signifikantem Hochwasserrisiko in der FGE Elbe. Hg. v. MLUR. Ministerium für Landwirtschaft Umwelt und ländliche Räume.
- Moss, Richard (2008): Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. IPCC Expert Meeting report : 19-21 September, 2007, Noordwijkerhout, the Netherlands. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Murray, A. Brad (2007): Reducing model complexity for explanation and prediction. In: *Geomorphology* 90 (3-4), S. 178–191. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.10.020.
- Nakićenović, Nebojša (2000): Special report on emissions scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nehlsen, Edgar; Kunert, Lisa; Fröhle, Peter; Knieling, Jörg (Hg.) (2014): Wenn das Wasser von beiden Seiten kommt – Bausteine eines Leitbildes zur Klimaanpassung für Elmshorn und sein Umland. Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten. Band 3. Hamburg: TuTech Verlag.
- Nelsen, Roger B. (2006): An introduction to copulas. 2. ed. New York, NY: Springer (Springer series in statistics). Online verfügbar unter [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2665354&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2665354&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).
- Nicholls, R. J.; Marinova, N.; Lowe, J. A.; Brown, S.; Vellinga, P.; Gusmao, D. de et al. (2010): Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4 C world' in the twenty-first century. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369 (1934), S. 161–181. DOI: 10.1098/rsta.2010.0291.
- Niedersachsen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1962): Niedersächsisches Küstenschutzprogramm. Deichbau und Küstenschutz ab 1963. Unter Mitarbeit von Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Hannover.
- NLWKN (2007): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen - Festland. Norden: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz (Küstenschutz, 1).
- Overbeek, J.Th. G. (1952): Elektrokinetic Phenomena. In: H. R. Kruyt (Hg.): *Colloid Science*, Bd. 1. New York: Elsevier Science Publishing Co, S. 197–209.
- Parchure, Trimbak M.; Mehta, Ashish J. (1985): Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 111 (10), S. 1308–1326. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:10(1308).
- Parker, Bruce B. (Hg.) (1991): Tidal hydrodynamics. New York NY u.a.: Wiley.

- Parris, Adam; Bromirski, Peter; Burkett, Virginia; Cayan, Daniel R.; Culver, Mary; Hall, John et al. (2012): Global sea level rise scenarios for the United States National Climate Assessment. Silver Spring, MD: U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Oceanic and Atmospheric Research, Climate Program Office (NOAA technical report OAR CPO, 1).
- Partheniades, Emmanuel (1965): Erosion and Deposition of Cohesive Soils. In: Journal of the Hydraulics Division, Bd. 91: American Society of Civil Engineers. Hydraulics Division, S. 105–139.
- Pasche, Erik (1984): Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung. Aachen: Rheinisch-Westf. Techn. Hochschule RWTH (Mitteilungen. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 52).
- Pasche, Erik (2004): Amphibische Räume an Ästuaren und Flachlandgewässern. Jubiläumskolloquium 5 Jahre Wasserbau an der TUHH. Hamburg-Harburg: Arbeitsbereich Wasserbau TUHH (Hamburger Wasserbau-Schriften, 3).
- Pasche, Erik; Donner, Monika; Nehlsen, Edgar (2010): Überprüfung und Verbesserung der Sedimentationsentwicklung in der Krückau und ihre Auswirkungen auf das Kanalisationsnetz der Stadt Elmshorn. Hamburg, unveröffentlicht.
- Perillo, G.M.E. (1989): New deodynamic definition of estuaries. In: Revista geofísica, Bd. 31. México: Inst, S. 281–287.
- Pfeffer, W. T.; Harper, J. T.; O'Neel, S. (2008): Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. In: *Science* 321 (5894), S. 1340–1343. DOI: 10.1126/science.1159099.
- Plöger, Wolf (2007): Sohlformen bei instationärer Strömung, Messung und Simulation. Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2007. Hamburg: Inst. f. Wasserbau TUHH (Hamburger Wasserbau-Schriften, 9).
- Postma, H. (1980): Sediment transport and sedimentation. In: Eric Olausson und Ingemar Cato (Hg.): Chemistry and biogeochemistry of estuaries. Chichester [England], New York: Wiley, S. 153–186.
- Postma, H.; Kalle, K. (1955): Die Entstehung von Trübungszonen im Unterlauf der Flüsse, speziell im Hinblick auf die Verhältnisse in der Unterelbe. In: *Deutsche hydrographische Zeitschrift* 8 (4), S. 137–144.
- Pritchard, D. W. (1967): What is an Estuary: physical viewpoint. In: George H. Lauff (Hg.): Estuaries. Washington ((American Association for the Advancement of Science. Publication, 83)), S. 3–5.

- Proetel, H. (1921): Teil III Wasserbau. See- und Hafengebäudebau. In: Robert Otzen (Hg.):  
Handbibliothek für Bauingenieure. Ein Nachschlagebuch für Studium und Praxis, Band 2.  
Berlin u.a.: Springer.
- Rechid, Diana; Petersen, Juliane; Schoetter, Robert; Jacob, Daniela (2014): Klimaprojektionen für  
die Metropolregion Hamburg. Hamburg: TuTech Verlag (Berichte aus den Klimazug-Nord  
Modellgebieten, 1).
- Richardson, J. F.; Zaki, W. N. (1954): Sedimentation and fluidisation: Part I. In: *Trans. Instn.  
Chem. Engrs.* 32, S. 35–53.
- Rijn, Leo C. van (1993): Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.  
Amsterdam: Aqua Publications.
- Rockel, Burkhard; Will, Andreas; Hense, Andreas (2008): The Regional Climate Model COSMO-  
CLM (CCLM). In: *Meteorol. Z.* 17 (4), S. 347–348. DOI: 10.1127/0941-2948/2008/0309.
- Roeckner, E. (2013): The atmospheric general circulation model ECHAM5 Part I: Model  
description. Max-Planck-Institut für Meteorologie. Hamburg (349).
- Rohde, Hans (1971): Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstrasse. Techn.  
Univ., Diss.--Hannover. In: *Mitteilungen des Franzius-Instituts f. Grund- u. Wasserbau der  
Techn. Univ. Hannover ; 36.1971.*
- Rönz, Bernd; Strohe, Hans Gerhard; Eckstein, Peter (1994): Lexikon Statistik. Wiesbaden:  
Gabler.
- Rupp, Chris (2013): Systemanalyse kompakt. 3. Aufl. Berlin u.a.: Springer Vieweg (IT kompakt).
- Salecker, D.; Gruhn, A.; Schlamkow, C.; Fröhle, P. (2012): Parametrization of Storm Surge  
Hydrographs using Univariate and Bivariate Statistical Models. In: Proc. PIANC-COPEDEC  
VIII. IIT Madras, Chennai, India, February 20 – 24th.
- Salomon, J. C.; Allen, G. P. (1983): Role sedimentologique de la maree dans les estuaires a fort  
marnage. Notes et memoires no 18. Compagnie Francaise des Pétroles.
- Scheel, Freek; De Boer, Wiebe P.; Brinkman, Rob; Luijendijk, Arjen P.; Ranasinghe, Roshanka  
(2015): ON THE GENERIC UTILIZATION OF PROBABILISTIC METHODS FOR  
QUANTIFICATION OF UNCERTAINTY IN PROCESS-BASED MORPHODYNAMIC  
MODEL APPLICATIONS. In: *Int. Conf. Coastal. Eng.* 1 (34), S. 88. DOI:  
10.9753/icce.v34.sediment.88.
- Schleswig-Holstein (2013): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein.  
Fortschreibung 2012. Kiel: Ministerium für Energiewende Landwirtschaft Umwelt und  
Ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein.

- Schleswig-Holstein Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1963): Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung, Küstenschutz in Schleswig-Holstein. Unter Mitarbeit von Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Kiel.
- Schlichting, Hermann; Gersten, Klaus; Krause, Egon (2006): Grenzschicht-Theorie. 10., überarb. Aufl. Berlin: Springer.
- Schrage, N.; Pasche, E. (2009): Efficient methods to link 1- and 2-dimensional fluvial flow models based on Finite Elements. In: Proceedings of the 33rd IAHR Conference. August 9-14. Vancouver, Canada.
- Schröder, Wolfgang; Zimmermann, Erich (1993): Zur kritischen Belastung einer kohäsiven Fließgewässersohle. In: *Die Wasserwirtschaft* 83 (3), S. 128–132.
- Schulte-Rentrop, A.; Rudolph, E. (2011): A sensitivity study of storm surges under climate change in the Elbe Estuary. In: Proceedings of the Acqua Alta 2011 Conference. Acqua Alta. Hamburg, 11.-13. Oktober 2011.
- Schultz, Edward A.; Simmons, Henry B. (1957): Fresh water-salt water density currents. A major cause of siltation in estuaries. Vicksburg, Miss: Waterways Experiment Station (Technical bulletin / Committee on Tidal Hydraulics, Corps of Engineers, US Army, 2).
- Schweim, Christoph (2005): Modellierung und Prognose der Erosion feiner Sedimente. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2005. Aachen: Shaker (Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, 141).
- Scully, Malcolm E.; Friedrichs, Carl T. (2007): Sediment pumping by tidal asymmetry in a partially mixed estuary. In: *J. Geophys. Res.* 112 (C7). DOI: 10.1029/2006JC003784.
- Seiffert, R.; Hesser, F.; Büscher, A.; Fricke, B.; Holzwarth, I.; Rudolph, E. et al. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. In: *Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports-Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2* (3.02).
- Siefert, Winfried (1985): Sturmfluten von 1901 bis 1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg. Ganglinien. Hamburg: Behörde für Wirtschaft Verkehr u. Landwirtschaft Strom- u. Hafenaufbau (Hamburger Küstenforschung, 44).
- Siefert, Winfried (1998): Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen. Die Entwicklung von 1950 bis 1997 und ihre Ursachen. In: *Die Küste : Archiv für Forschung u. Technik an d. Nord- u. Ostsee ; archive for research and technology on the North Sea and Baltic Coast* 60 (1998), S. 1–115.
- Socolofsky, S. A.; Jirka, Gerhard H. (2002): Environmental fluid mechanics. Part I: Mass transfer and diffusion. Engineering-lectures [online]. Vorlesungsskript: Universität Karlsruhe. Online verfügbar unter <http://www.ifh.uni->

- karlsruhe.de/lehre/envflu\_i/Downloads/course\_script/ed2/script\_ed2.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2015.
- Spreafico, Manfred (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Praxishilfe. Bern: BWG (Berichte des BWG Serie Wasser, 4).
- Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung et al. (Hg.) (2013): Climate change 2013. The physical science basis : Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5): Cambridge University Press.
- Teschke, Ulf (2004): Zur Berechnung eindimensionaler instationärer Strömungen von natürlichen Fließgewässern mit der Methode der Finiten Elemente. Techn. Univ., Arbeitsbereich Wasserbau, Diss.--Hamburg-Harburg, 2003. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl (Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 7, Strömungstechnik, 458).
- Thode, Karsten; Eichweber, Günther (2011): Die strombauliche Entwicklung des Schifffahrtsweges Tideelbe im 20. Jahrhundert und die Herausforderungen für die Zukunft. In: *Wasserwirtschaft : Hydrologie, Wasserbau, Boden, Ökologie ; Organ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall* 101 (6), S. 22–26. Online verfügbar unter X:\Nehlsen\Dissertation\Citavi\Literaturdokumente\Thode\_2011.pdf.
- Tiemann, Karl-Heinz (2012): Der Erwerbsobstbau an der Niederelbe mit dem Zentrum Altes Land. Voraussetzungen durch Standortfaktoren, Organisationsstrukturen und anbautechnische Entwicklungen. Jork: Obstbauversuchsring des Alten Landes (Publikationen der Kulturstiftung Altes Land, 5).
- van der Linden, Paul; Mitchell, John F.B. (Hg.) (2009): Ensembles Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales. Summary of research and results from the ENSEMBLES project. ENSEMBLES project. Online verfügbar unter [http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles\\_final\\_report\\_Nov09.pdf](http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf), zuletzt aktualisiert am 13.11.2009, zuletzt geprüft am 24.02.2012.
- van Straaten, L. M. J. U.; Kuenen, Ph. H. (1958): Tidal Action as a Cause of Clay Accumulation. In: *SEPM JSR* Vol. 28. DOI: 10.1306/74D70826-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- Varendorf, Gustav Adolf (1984): Topographisch militärische Chartre des Herzogthums Holstein. Kiel.
- Vautard, Robert; Gobiet, Andreas; Sobolowski, Stefan; Kjellstroem, Erik; Stegehuis, Annemiek; Watkiss, Paul et al. (2014): The European climate under a 2°C global warming. In: *Environmental Research Letters* 9 (3), S. 034006. Online verfügbar unter <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=3/a=034006>.
- Vellinga, Pier; Katsman, Caroline; Sterl, Andreas; Beersma, Jules; Hazeleger, Wilco; Church, John et al. (2009): Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. International Scientific Assessment carried out at request of the Delta Comm. The Netherlands, Sept. 2008. De Bilt: KNMI (Wetenschappelijk rapport / Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 09-05).

- Wahl, Thomas; Jensen, Jürgen; Mudersbach, Christoph (2011): A multivariate statistical model for advanced storm surge analyses in the North Sea. In: *Int. Conf. Coastal. Eng.* 1 (32), S. 19.
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2014): Portal Tideelbe. Online verfügbar unter <http://www.portal-tideelbe.de/>, zuletzt geprüft am 04.02.2014.
- Weilbeer, Holger (2003): Zur dreidimensionalen Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Ästuaren. In: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* (86), S. 109–111. Online verfügbar unter <http://vzb.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/weilbeer.pdf>, zuletzt geprüft am 20.10.2015.
- Weisse, Ralf; Bellafiore, Debora; Menéndez, Melisa; Méndez, Fernando; Nicholls, Robert J.; Umgiesser, Georg; Willems, Patrick (2014): Changing extreme sea levels along European coasts. In: *Coastal Engineering* 87, S. 4–14. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2013.10.017.
- Winterwerp, Hans (1999): On the dynamics of high-concentrated mud suspensions. Techn. Univ., Diss.--Delft. Delft: Delft Univ. of Technology (Communications on hydraulic and geotechnical engineering, 99-3).
- Woodworth, P. L.; White, N. J.; Jevrejeva, S.; Holgate, S. J.; Church, J. A.; Gehrels, W. R. (2009): Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century timescales. In: *Int. J. Climatol.* 29 (6), S. 777–789. DOI: 10.1002/joc.1771.
- WSA Hamburg; HPA (1996): Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe. Gutachten Ausbaubedingte Änderung der Tidedynamik. Online verfügbar unter [https://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA1999/Antragsunterlagen/UVU/Materialbestaende/Bereichsauswahl\\_Band\\_I/Texte\\_Band\\_I/Gutachten\\_Tidedynamik\\_UVU95.pdf](https://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA1999/Antragsunterlagen/UVU/Materialbestaende/Bereichsauswahl_Band_I/Texte_Band_I/Gutachten_Tidedynamik_UVU95.pdf).
- WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority (2012a): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt. Abschlussbericht zur Beweissicherung (Bericht 2011). Online verfügbar unter [https://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA1999/Beweissicherung/bericht2011/anlagen/Bericht\\_Abschluss\\_endfassung\\_20120215\\_NEU\\_b.pdf](https://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA1999/Beweissicherung/bericht2011/anlagen/Bericht_Abschluss_endfassung_20120215_NEU_b.pdf).
- WSA Hamburg, HPA - Hamburg Port Authority (2012b): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt. Bericht zur Beweissicherung (Bericht 2007). Online verfügbar unter [https://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA1999/Beweissicherung/bericht2011/anlagen/Bericht\\_Abschluss\\_endfassung\\_20120215\\_NEU\\_b.pdf](https://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA1999/Beweissicherung/bericht2011/anlagen/Bericht_Abschluss_endfassung_20120215_NEU_b.pdf).
- Yalin, M. S.; Da Silva, A. M. (2001): Fluvial processes. Delft: IAHR (Monograph / International Association of Hydraulic Engineering and Research).
- Zanke, Ulrich (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Mit 13 Tabellen. Berlin u.a: Springer (Hochschultext).

## Lebenslauf

Name:	Nehlsen
Vorname:	Edgar
Geburtsdatum:	18.07.1981
Geburtsort, -land:	Lübeck, Deutschland
07/1988 – 06/1992	Grundschule Schönböcken, Lübeck
07/1992 – 06/2001	C.-J.-Burekhardt- Gymnasium, Lübeck
07/2001 – 09/2002	Praktika in Baufirmen, Norddeutschland
10/2002 – 05/2008	Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg Abschluss: Dipl.-Ing.
06/2008 – 06/2014	Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg Institut für Wasserbau, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
07/2014 – heute	Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg Institut für Wasserbau, Oberingenieur