



Zwischenbericht

zum Projekt „Zukunft Eider -
Wasserwirtschaftliche und wasserbauliche Systemstudie
des Eider-Treene-Systems“

über die Projektarbeiten in der ersten Projekthälfte der Jahre **2019 bis 2022**

erstellt am 22.06.2023

durch die Kerngruppe und das Projektbüro am Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-
Nordsee



Dr. Thomas Hirschhäuser
Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein



Henke Hund
Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein



Dr. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Dennis Meißner, Peter Krahe
Bundesanstalt für Gewässerkunde



Dr. Frank Kösters, Elke Siegmann, Janina Freund
Bundesanstalt für Wasserbau, Standort Hamburg



Sabine Mahner, Oliver Ketelsen
Projektbüro am Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee

Im Auftrag der Lenkungsgruppe „Zukunft Eider“:



WSV.de
Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

Herr Thode
Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Standort Kiel

Frau Dr. Gätje
Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee



Herr Dr. Oelerich, Herr Rahn
Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur



Frau Matelski
Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein



Herr Reimers
Deich- und Hauptsielverband Dithmarschen



Herr Bonse, Herr Rabeler
Deich- und Hauptsielverband Eiderstedt



Herr Schwarz
Eider-Treene-Verband



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
1. Veranlassung und Zielsetzung	13
2. Charakteristik des Untersuchungsgebietes	14
2.1 Gewässer	14
2.1.1 Die Eider	14
2.1.2 Die Treene	24
2.1.3 Die Sorge	27
2.2 Charakteristik des Eider-Einzugsgebietes	28
2.2.1 Klima und Wasserhaushalt	28
2.2.2 Landnutzung	34
2.2.3 Boden und Geologie	35
2.3 Bauwerke und technische Anlagen zur Wasserbewirtschaftung	37
2.3.1 Eider-Sperrwerk	38
2.3.2 Schleuse und Wehranlage Nordfeld	40
2.3.3 Schifffahrts- und Entwässerungsschleuse sowie Spülschleuse Friedrichstadt 41	
2.3.4 Deiche und Dämme	43
2.3.5 Zusammenwirken der baulichen Anlagen	45
2.4 Wasserwirtschaftliche Anlagen und Schöpfwerke	48
3. Datengrundlage	52
3.1 Hydrodynamik und Sedimenttransport	52
3.1.1 Beschreibung des Ist-Zustandes - Grundlagenermittlung	52
3.1.2 Erhebung fehlender Datensätze	56
3.2 Messstellen im Gewässernetz	57
3.2.1 Messstellen der WSV	57
3.2.2 Messstellen des LKN.SH	59

3.3	Pegel im Grundwasser	66
3.4	Datenerhebungen zur Morphologie der Treene und der Eider des Landes SH....	67
3.4.1	Morphologische Datenerhebungen der Eider	67
3.4.2	Morphologische Datenerhebungen der Treene.....	68
4.	Komponenten des Modellsystems	69
4.1	Modellierungsverfahren UNTRIM ²	70
4.2	Modellierungsverfahren SediMorph	71
4.3	Modellsystem SOBEK	72
4.4	Hydrologisches Modellframework HydPy	73
4.5	Wasserhaushaltsmodellsystem WALRUS.....	73
5.	Wasserbauliche Systemanalyse der Tideeider inkl. des Sedimentmanagements.....	76
5.1	Allgemeines.....	76
5.2	Beschreibung des Ist-Zustandes.....	76
5.2.1	3D-HN-Modell der Außen- und Tideeider	76
5.2.2	Erweiterung Sedimenttransport.....	78
5.3	Identifizierung von Optimierungspotentialen	78
5.3.1	Optimierungsvarianten.....	78
5.3.2	Erste Ergebnisse aus den Systemstudien der Optimierungsvarianten	79
5.4	Beschreibung und Optimierung zukünftiger Systemzustände.....	86
5.4.1	Zukünftige hydrologische Szenarien (Klimawandel)	86
5.4.2	Zukünftige topographische Szenarien (Versandung)	87
5.5	Bearbeitung weiterer Fragestellungen	87
6.	Wasserwirtschaftliche Beschreibung und Optimierung des Systems	88
6.1	Allgemeines.....	88
6.2	Vorstudien zur Tieflandhydrologie.....	88
6.2.1	Vorstudie NOK	88
6.2.2	Vorstudie Eider	91
6.2.3	Vertiefte Vorstudien Norderbootfahrt	93
6.2.4	Forschungsanträge	94

6.3	Beschreibung des Ist-Zustandes der Wasserbewirtschaftung.....	95
6.3.1	Einzugsgebiet	95
6.3.2	Gewässersystem Eider-Treene-Sorge.....	98
6.4	Identifizierung von Optimierungspotentialen zum Hochwasserschutz	104
6.5	Operationelle Optimierung der Wasserbewirtschaftung und des Hochwassermanagements.....	107
7.	Belange des Naturschutzes und der Ökologie	109
7.1	Schutzgebiete und Managementpläne	109
7.2	Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und Bewirtschaftungsplanung.....	111
8.	Termine, Gespräche, Bereisungen und Projektkommunikation.....	113
8.1	Projektkommunikation	113
8.1.1	Interne Projektkommunikation.....	113
8.1.2	Externe Projektkommunikation	114
8.2	Bereisungen	115
8.3	Messkampagnen	115
9.	Produkte	116
9.1	BAW	116
9.2	BfG.....	116
10.	Zusammenfassung	118
	Literaturverzeichnis	120

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Das Eider-Einzugsgebiet, untergliedert in die Teileinzugsgebiete Tideeider, Binneneider, Treene und Sorge. Zusätzlich dargestellt, das Einzugsgebiet des Ehster-Hauptsielzugs, der in die Außeneider bzw. in die Nordsee entwässert. Im Hintergrund das Höhenmodell; Quelle: LfU, 2023.....	15
Abbildung 2-2: Übersichtsplan der Eider; Quelle: WSA Elbe-Nordsee	16
Abbildung 2-3: Betriebsstatistik des Eider-Sperrwerkes der Jahre 2016 bis 2018 bezogen auf die Thw; Quelle: WSA Elbe-Nordsee	20
Abbildung 2-4: Betriebsstatistik des Eider-Sperrwerkes der Jahre 2016 bis 2018 bezogen auf die Tnw; Quelle: WSA Elbe-Nordsee	21
Abbildung 2-5: Anzahl des Sielbetriebes des Eider-Sperrwerkes in den Jahren von 1973 bis 2018; Quelle: WSA Elbe-Nordsee	22
Abbildung 2-6: Morphologischer Raum der Außen- und Tideeider, berechnet aus den historischen Höhenmodellen des LKN.SH ab 1972 und des DGM-W 2016/2017, Hintergrundkarte DTK250 © GeoBasis-DE / BKG (2023)	24
Abbildung 2-7: Mittlere jährliche Niederschlagssumme im Zeitraum 1991-2020; Datengrundlage: DWD, HYRAS-PRE	29
Abbildung 2-8: Mittlere Lufttemperatur im Winter (Dezember, Januar, Februar; links) und Sommer (Juni, Juli, August; rechts) der Zeitreihe 1961-90 im Eidergebiet; Datenquelle: DWD	30
Abbildung 2-9: Mittlere Windgeschwindigkeit (ohne Berücksichtigung der Landnutzung) im Jahresmittel der Zeitreihe 1961-90 im Eidergebiet; Datenquelle: DWD	31
Abbildung 2-10: Jahreszeitliche Verteilung (Monatsmittel bzw. -summen) von Niederschlagshöhe (RR) und Lufttemperatur (oben), maximale Tagesniederschlagshöhe (RS) und Windstärke (WS) (Mitte) sowie Sonnenscheindauer (Sd) und Wolkenbedeckungsgrad (NW) an der Klimastation Schleswig für die Zeitreihe 1991-2020; Datenquelle: DWD	32
Abbildung 2-11: Links: Übersichtskarte des Grund- und Stauwassereinflusses. Kartengrundlage: Leitböden der BÜK250 (LfU 2018, unveröffentlicht). Rechts: Bodenkundlicher Grundwasserflurabstand; Kartengrundlage: Leitböden der BÜK250, LfU 2022.....	33
Abbildung 2-12: Mittlere tatsächliche Verdunstungshöhe (ETA) und Abflusshöhe (AH) der Zeitreihe 1961-1990; Datengrundlage: HAD 2003	34

Abbildung 2-13: 6 Hauptkategorien der Landnutzung / Landbedeckung und deren prozentualer Anteil; Datengrundlage: ALKIS (© GeoBasis-DE/LVermGeo, Stand: 2022)	35
Abbildung 2-14: Vereinfachte Karte der Leitbodentypen; Datengrundlage BÜK250, LfU	36
Abbildung 2-15: Vereinfachte Karte der Bodenartenschichtungen; Datengrundlage BÜK250, LfU	37
Abbildung 2-16: Eider-Sperrwerk mit Blickrichtung stromauf, Foto © BAW 2019	38
Abbildung 2-17: Schleuse und Wehranlage Nordfeld, Foto © BAW 2019	40
Abbildung 2-18: Schifffahrts- und Entwässerungsschleuse (rechts mittig) und Spülschleuse (links unten) in Friedrichstadt, Foto © BAW 2019	42
Abbildung 2-19: Deiche und Dämme im Untersuchungsgebiet, Hintergrundkarte DTK250 © GeoBasis-DE / BKG (2020)	44
Abbildung 2-20: Zusammenwirken der wasserbaulichen Anlagen im Normalbetrieb	45
Abbildung 2-21: Zusammenwirken der wasserbaulichen Anlagen bei Hochwasser in der Treene	46
Abbildung 2-22: Zusammenwirken der wasserbaulichen Anlagen bei Niedrigwasser	47
Abbildung 2-23: Wasserwirtschaftliche Anlagen im Untersuchungsgebiet (Datengrundlage: Digitales Anlagenverzeichnis Schleswig-Holstein, Wasser- und Bodenverbände des Landes Schleswig-Holstein und Land Schleswig-Holstein, Fließgewässerlandschaften LfU)	49
Abbildung 2-24: Schöpfwerke im Untersuchungsgebiet; Datengrundlage: DAV -WBV/Land SH, Fließgewässerlandschaften LfU	50
Abbildung 2-25: Wehre im Untersuchungsgebiet; Datengrundlage: DAV -WBV/Land SH, Fließgewässerlandschaften LfU	51
Abbildung 3-1: Wasserstands- und Abflusspegel im Oberflächenwasser vor dem Hintergrund der Fließgewässerlandschaften; Datengrundlage: Pegel WSV/Land SH, Fließgewässerlandschaften LfU	57
Abbildung 3-2: Lage der Grundwassermessstellen; Datengrundlage: Messstellen Land SH, Fließgewässerlandschaften LfU	67
Abbildung 3-3: DGM Treene zwischen Friedrichstadt und Hollingstedt; Quelle: LKN.SH	68
Abbildung 4-1: Übersicht der drei zentralen Modellinstrumente im Projekt „Zukunft Eider“	69
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Verknüpfung von Daten und Modellen im Projekt „Zukunft Eider“	70

Abbildung 4-3: Übersicht des Modellgebiets des 3D-HN-Modells der Außen- und Tideeider, Hintergrundkarte DTK250 © GeoBasis-DE / BKG (2021)	71
Abbildung 5-1: Wasserstände am Pegel Tönning im Kalibrierzeitraum	77
Abbildung 5-2: Optimierungsvarianten Strombauwerke, mittleres Tidehochwasser	80
Abbildung 5-3: Optimierungsvarianten Strombauwerke, mittleres Tideniedrigwasser ...	81
Abbildung 5-4: Optimierungsvarianten Strombauwerke, mittlerer Tidehub.....	81
Abbildung 5-5: Optimierungsvariante Vergrößerung Fließquerschnitt, mittleres Tidehochwasser.....	82
Abbildung 5-6: Optimierungsvariante Vergrößerung Fließquerschnitt, mittleres Tideniedrigwasser.....	83
Abbildung 5-7: Optimierungsvariante Vergrößerung Fließquerschnitt, mittlerer Tidehub	83
Abbildung 5-8: Optimierungsvariante Vergrößerung Fließquerschnitt, mittleres Tidemittelwasser	84
Abbildung 5-9: Optimierungsvariante zusätzlicher Flutraum, mittleres Tidehochwasser .	85
Abbildung 5-10: Optimierungsvariante zusätzlicher Flutraum, mittleres Tideniedrigwasser	85
Abbildung 5-11: Optimierungsvariante zusätzlicher Flutraum, mittlerer Tidehub.....	86
Abbildung 6-1: Gebiet von Eider und NOK mit den Fließgewässerlandschaften (BfG auf Grundlage der Daten vom LfU Schleswig-Holstein, BfG (2021)).	89
Abbildung 6-2: Im Rahmen der Vorstudie untersuchte Pilotgebiete im Eider-Einzugsgebiet	92
Abbildung 6-3: System-Skizze des 1D-HN-Modells für das Eider-Treene-Gebiet.....	100
Abbildung 6-4: Festlegung von Querprofilspuren und Fließzonen im 1D-HN-Modell der Eider (Quelle Hydrotec)	101
Abbildung 6-5: Berücksichtigung verzweigter Fließwege und Sommerdeiche im 1D-HN-Modell (Quelle Hydrotec)	102
Abbildung 6-6: Vergleichende Darstellung der Wasserstände an der unteren Treene sowie der Windverhältnisse während des Hochwassers 2012	103
Abbildung 6-7: System-Skizze des SOBEK-Modells: Ausschnitt Treene	105
Abbildung 6-8: Beispiel für die Abbildung eines Treene-Polders im 1D-HN-Modell (hier Polder Stapel) im Ist-Zustand (großes Bild) sowie in einer Modellvariante (kleiner Ausschnitt)	106

Abbildung 6-9: Schematische Darstellung des Zusammenspiels von Daten und Modellen
innerhalb eines Vorhersagesystems für die Wasserstraßen.....108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Hauptwerte der Außen-, Tide-, und Binneneider; Quelle: WSA Elbe-Nordsee	18
Tabelle 2-2: Hydrologische Hauptwerte ausgewählter Pegel der Treene sowie ihrer Nebengewässer	26
Tabelle 2-3: Hydrologische Hauptwerte der Sorge	27
Tabelle 3-1: Liste der Wasserstandspegel, Betreiber: WSV	58
Tabelle 3-2: Analoge Erfassung der Wasserstandspegel an der Eider, Betreiber: WSV ...	58
Tabelle 3-3: Liste der 7 Durchflussmessanlagen, Betreiber LKN.SH	60
Tabelle 3-4: Liste der 15 Abflussmessstellen, Betreiber LKN.SH	61
Tabelle 3-5: Liste der 30 Wasserstandspegel (davon 4 stillgelegt), Betreiber LKN.SH	62
Tabelle 3-6: Binneneiderzuflüsse	64
Tabelle 3-7: Tideeiderzuflüsse	64
Tabelle 3-8: Größere Zuflüsse	65
Tabelle 3-9: Liste der Wasserstandspegel im Untersuchungsgebiet Alte Sorge / Steinschleuse, die vom Eider-Treene-Verband betrieben werden. W-Pegel bei Schöpfwerken sind hier nicht gelistet.	65
Tabelle 6-1: Vereinfachte Übersicht der geplanten Szenarienuntersuchungen zur Optimierung des Hochwasserschutzes	107

Abkürzungsverzeichnis

ADCP	Accoustic Doppler Current Profiler
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
AP	Außenpegel
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BP	Binnenpegel
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BÜK	Bodenübersichtskarte
DAV	Digitales Anlagenverzeichnis Schleswig-Holstein
DGM	Digitales Geländemodell
DTK	Digitale Topographische Karte
DWD	Deutscher Wetterdienst
EWWD	Eider-Wach- und Warndienst des LKN.SH
EZG	Einzugsgebiet
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
GIS	Geoinformationssystem
GuLV	Gewässer- und Landschaftsverband
HENRY	Hydraulic Engineering Repository
HN-Modell	Hydrodynamisch-numerisches Modell
HQ	Höchster Abfluss eines angegebenen Zeitraumes
HYRAS-PRE	Hydrometeorologischer Rasterdatensatz Niederschlag
Land SH	Land Schleswig-Holstein
LARSIM	Large Area Runoff Simulation Model
LKN.SH	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein
LfU	Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
MEKUN	Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur Schleswig-Holstein
MHQ	Mittlerer Höchster Abfluss eines angegebenen Zeitraumes
MHW	Mittleres Hochwasser
MNQ	Mittlerer Niedrigster Abfluss eines angegebenen Zeitraumes
MNW	Mittleres Niedrigwasser
MQ	Mittlerer Abfluss eines angegebenen Zeitraumes

MThw	Mittleres Tidehochwasser
MTnw	Mittleres Tideniedrigwasser
MW	Mittelwasser
NDR	Norddeutscher Rundfunk
NTnw	Niedrigstes Tideniedrigwasser eines angegebenen Zeitraumes
NQ	Niedrigster Abfluss eines angegebenen Zeitraumes
OW	Oberwasser
PNP	Pegelnullpunkt
SH	Schleswig-Holstein
SOBEK	Eigenname
TEZG	Teileinzugsgebiet
Thw	Tidehochwasser
Tnw	Tideniedrigwasser
UW	Unterwasser
WALRUS	The Wageningen Lowland Runoff Simulator
WBV	Wasser- und Bodenverbände
WHM	Wasserhaushaltsmodell
W-Pegel	Wasserstandspegel
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WWJ	Wasserwirtschaftsjahr November - Oktober

1. Veranlassung und Zielsetzung

Die Eider ist ein Flachlandgewässer, welches derzeit von der Mitte Schleswig-Holsteins nach Westen gerichtet in die Nordsee mündet. Seit mehreren Jahrzehnten unterliegen die Gewässersysteme von Eider und der einmündenden Treene starken natürlichen und künstlichen Veränderungen. In der Tideeider wird ein Sedimenteintrag beobachtet. Als Folge der Sedimentation verringern sich u.a. die Gewässerprofile und das natürliche Gefälle, und Seitenbereiche verlanden. Somit wird die Entwässerung des Hinterlandes zunehmend beeinträchtigt. Das Eider-Sperrwerk sowie die Anlagen Nordfeld und in Friedrichstadt erzielen als Unterstützung zur Entwässerung einen immer geringer werdenden Erfolg.

Hinzu kommen langfristig Auswirkungen des Klimawandels, wie veränderte Niederschläge und ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg.

Aus dieser Entwicklung ergibt sich folgende Kernfrage: Wie kann die Entwässerung des Eider-Einzugsgebietes erhalten bzw. optimiert und parallel der Versandung der Eider entgegengewirkt sowie die Schiffbarkeit erhalten werden?

Die zuständigen Behörden und Körperschaften des öffentlichen Rechts haben sich entschieden gemeinsam umfangreiche hydrologische und morphologische Untersuchungen auszuführen.

Mit dem Projekt „Zukunft Eider“ werden Vorarbeiten zur Schaffung einer erforderlichen Anpassung und Erweiterung der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur im Einzugsgebiet durchgeführt.

Daraus ergibt sich der Bedarf einer modellgestützten Untersuchung des Eider-Treene-Systems mit der Zielsetzung,

- die weitere morphologische Entwicklung der Tideeider hinsichtlich ihrer Funktion als Vorfluter möglichst günstig zu beeinflussen,
- die Entwässerung des Eider-Treene-Systems mit Hilfe eines optimierten Betriebes der wasserwirtschaftlichen Anlagen und eines zu entwickelnden Vorhersagesystems kurzfristig zu erhalten und das System langfristig an den Klimawandel und die Landsenkung anzupassen und
- die Schifffahrt zu erhalten

2. Charakteristik des Untersuchungsgebietes

2.1 Gewässer

Die küstennahen Gewässer werden von zwei Seiten mit Wasserzufuhr beansprucht. Zum einen findet der Abfluss aus dem Einzugsgebiet statt, zum anderen drängt das Meerwasser durch die Tideschwingung in das Regime ein. Diese beiden grundsätzlichen Wirkungslinien werden hier vereint. Der Abfluss des Einzugsgebiets ist diskontinuierlich klimatisch bedingt, die Tideerscheinung von dem regelmäßigen astronomischen Planetenumlauf angetrieben. Diese beiden Phänomene treffen hier sowohl für die Hydrologie als auch für die Morphologie zusammen und müssen bewirtschaftet werden.

2.1.1 Die Eider

2.1.1.1 Allgemeines zur Eider

Die Eider hat eine Länge von 110 km und ein Einzugsgebiet von 2072 km² (ohne TEZG Außeneider, vgl. Abbildung 2-1). Die Binneneider beginnt in Rendsburg (vgl. Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2). Sie fließt in Mäandern¹ durch die von zahlreichen Mooren geprägte Eiderniederung über die Schleuse Lexfähre bis hin zur Schleuse und Wehranlage Nordfeld.

¹ Mäander sind durch natürliche Fließvorgänge und Feststoffbewegungen entstehende mehr oder weniger regelmäßig aufeinanderfolgende Flussschlingen, DIN 4049-3: 1994-10.

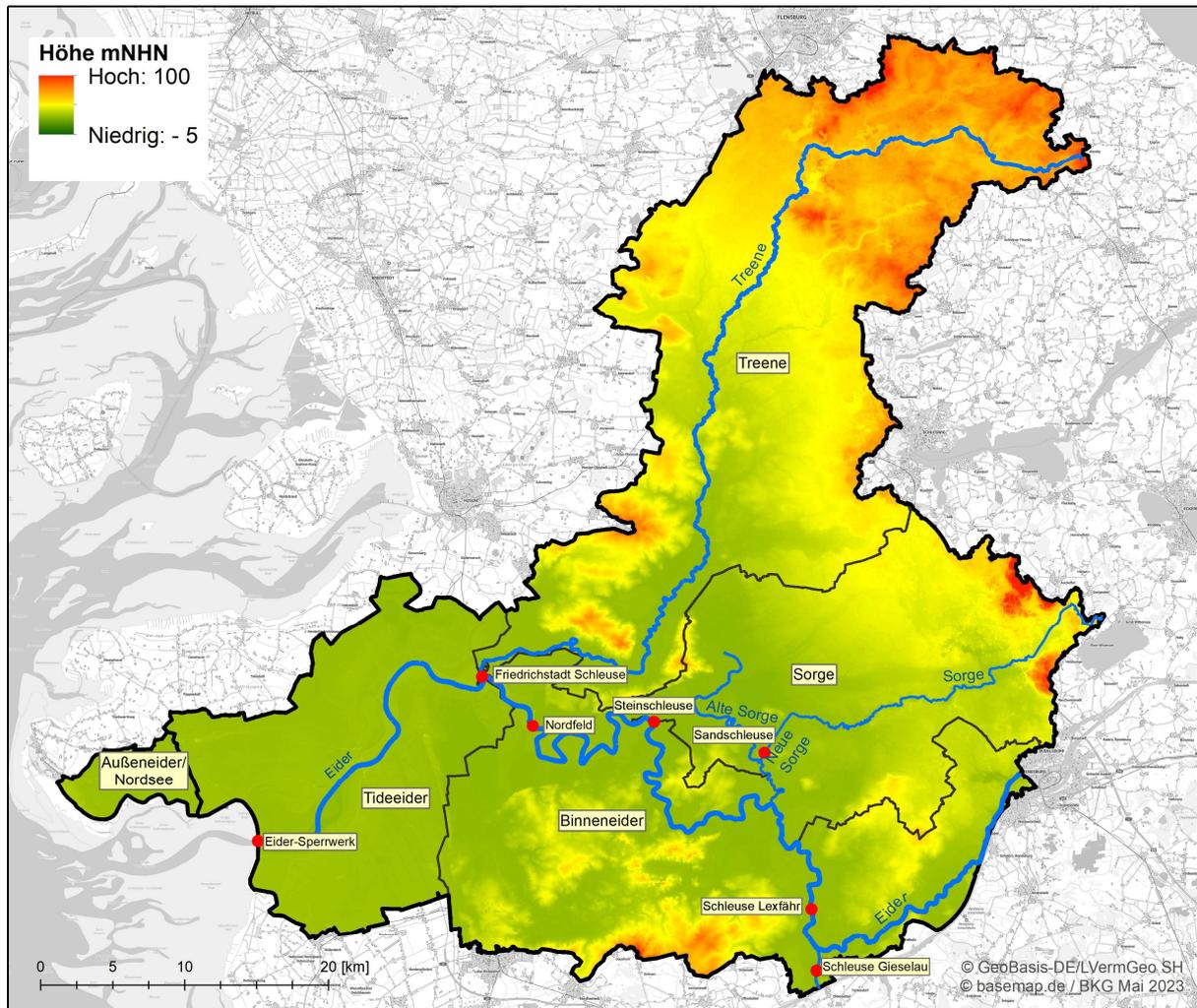


Abbildung 2-1: Das Eider-Einzugsgebiet, untergliedert in die Teileinzugsgebiete Tideeider, Binneneider, Treene und Sorge. Zusätzlich dargestellt, das Einzugsgebiet des Ehster-Hauptzielzugs, der in die Außeneider bzw. in die Nordsee entwässert. Im Hintergrund das Höhenmodell; Quelle: LfU, 2023

Dort endet der tidebeeinflusste Abschnitt der Eider, die sogenannte Tideeider. Die Tideeider fließt an Friedrichstadt vorbei. In Friedrichstadt mündet die Treene über ein Siel in die Tideeider. 20 km stromab von Nordfeld weitet sich in Tönning das Eiderästuar auf. Beiderseits der Hauptrinne flankieren ausgedehnte Wattflächen die Tideeider. Nach weiteren 12 km mündet die Tideeider am Eider-Sperwerk in die Außeneider.



Abbildung 2-2: Übersichtsplan der Eider; Quelle: WSA Elbe-Nordsee

2.1.1.2 Geschichte der Eider

Ab dem ausgehenden Mittelalter wurde begonnen, die Flüsse im Einzugsgebiet der Eider umzugestalten (Wieland 1999). Von 1460 bis 1522 wurde der Unterlauf der Treene eingedeicht und 1570 an der Mündung abgedämmt. Es wurden Seen trockengelegt. Im Gebiet der Sorge wurde der Flusslauf mehrfach umgelegt. Der Gezeiteneinfluss drang in den Folgejahren immer weiter flussaufwärts, bis er 1700 Rendsburg erreichte. Im Zuge des Baus des Eider-Kanals (Schleswig-Holstein Kanal, 1777 bis 1784) wurde in Rendsburg eine Schleuse errichtet. Mit ihr wurde auch der Gezeiteneinfluss stromaufwärts gestoppt.

Mit dem Bau des Nord-Ostsee-Kanals 1887 bis 1895 verlor die Eider ein Drittel ihres Einzugsgebietes. Zudem wurde die Schleuse in Rendsburg durch eine größere Schleuse ersetzt (Fülscher 1898). Weitere Deichbauten engten den Überflutungsraum ein, wodurch sich der Tidehub erhöhte. Um 1900 betrug der Tidehub bei Rendsburg 1,29 m. Auf den gering tragfähigen Böden konnten die Deiche nicht weiter erhöht werden. Bei Sturmfluten kam es zu Deichbrüchen. Um dieses Problem zu lösen, wurde 1934 bis 1936 die Eider 5,5 km oberhalb von Friedrichstadt bei Nordfeld mit einem Siel- und Schleusenbauwerk abgedämmt. Die Schleuse und Wehranlage Nordfeld trennt seitdem die Binneneider von der Tideeider ab. Um für die Schifffahrt im oberen Bereich der Binneneider einen 0,8 m höheren Wasserstand vorzuhalten, erfolgte 1936/37 der Bau der Schiffschleuse Lexfähre. Zusätzlich wurde ein Siel errichtet, welches 1951 zu einem Schöpfwerk umgebaut wurde. Oberhalb der Schleuse Lexfähre verbindet der Gieselau-Kanal über ein weiteres Schleusenbauwerk die Binneneider mit dem Nord-Ostsee-Kanal. Die Schleuse in Rendsburg als bisherige Verbindung von Eider und NOK wurde verbaut und zugeschüttet (Persönliche Mitteilung Herr Neemann, GDWS Kiel 02.06.2023 und NABU-Broschüre „Die Eider“).

Durch die Absenkung des mittleren Binnenwasserstandes konnten viele Gebiete zunächst wieder über Siele entwässern. Allerdings veränderten sich die hydrodynamischen Bedingungen unterhalb von Nordfeld maßgeblich. Die Tidewelle wird an der Anlage Nordfeld gestoppt und reflektiert. Zudem verformte sich die Tidekurve und bildete einen steileren Flut- und einen flacheren Ebbeast. In Folge kam es im Ästuar der Tideeider zu einem erheblichen Sedimenteintrag:

- Von 1936 (Bau Schleuse Nordfeld) bis 1963 lagerten sich 40 Mio. m³ Feinsand in der Tideeider zwischen Tönning und Nordfeld ab und die Querschnitte verringerten sich um 90 %.
- Das MTnw, das 1936 auf -1,59 m NHN gesunken war, stieg auf -0,26 m NHN (1966 /70).

Um der Versandung der Tideeider entgegen zu wirken, wurde ab 1950 ein Spülbetrieb eingeführt. Dazu wurden Bühnen am oberen Ende des Ästuars errichtet, um die Querschnitte zu begrenzen. Man ließ den Flutstrom durch die Anlage Nordfeld in die Binneneider fließen und schloss sie bei Tidekenterung. So wurde Wasser oberhalb der Anlage Nordfeld eingestaut. Mit der nächsten ablaufenden Tide verstärkte dieses eingestaute Wasser den Ebbstrom. Allerdings gelang es nicht mit dem Spülbetrieb, die Sedimentation der Tideeider aufzuhalten (persönliche Auskunft Herr Neemann, GDWS Kiel 2023).

Die Auswirkungen der Errichtung des Siele- und Schleusenbauwerkes Nordfeld für die Schifffahrt und Binnenentwässerung sowie die Folgen der schweren Sturmflut im Februar 1962 bewegten das Land Schleswig-Holstein dazu, die Eider 1973 mittels eines Sperrwerks mündungsnah (Linie Hundeknöll-Vollerwiek) abzdämmen. Zwar sollen die Tiden weiterhin ein- und ausschlagen können, doch soll der höchste Wasserstand in der Tideeider auf 2,0 m NHN begrenzt werden. Bei Bedarf soll die Tideeider zudem als Zwischenspeicher für die Binnenentwässerung eingesetzt werden können.

2.1.1.3 Hydrologie der Eider

Die Hauptwerte der Eider sind in der Tabelle 2-1 dargestellt. Die Jahresbezüge orientieren sich an den letzten baulichen Veränderungen sowie an den Stand der Datenplausibilisierung der drei Eiderabschnitte. Zur Hauptwertebildung wurden die Tidescheitel der frei ein- und ausströmenden Tiden (im Weiteren als unbeeinflusst bezeichnet) herangezogen.

Tabelle 2-1: Hauptwerte der Außen-, Tide-, und Binneneider; Quelle: WSA Elbe-Nordsee

Gewässer	Pegel	HHthw (ab 26.07.1972) [cmPNP]	MThw (2006-2015) unbeeinflusst [cmPNP]		MTnw (2006-2015) unbeeinflusst [cmPNP]	NNTnw (ab 26.07.1972) [cmPNP]	MThb (2006-2015) unbeeinflusst [cm]
Nordsee, Außeneider	Eider- Sperrwerk AP	1002 03.01.1976	656		355	157 02.03.1987	302
		HThw (1973-2015) [cmPNP]				NTnw (1973-2015) [cmPNP]	
Tideeider	Eider- Sperrwerk BP	699 17.01.1975	612		358	161 02.03.1987	267
	Tönning	711 09.06.2003	625		377	241 05.04.1989	258
	Friedrichstadt Strbr	724 26.09.1973	629		427	252 05.04.1989	213
	Nordfeld UW	726 09.06.2003	632		436	247 05.04.1989	207
		HW (1937-2015) [cmPNP]	MHW (2006-2015) [cmPNP]	MW (2006-2015) [cmPNP]	MNW (2006-2015) [cmPNP]	NW (1937-2015) [cmPNP]	
Binneneider	Nordfeld OW	631 23.11.1963	553	459	409	346 16.12.1938	
	Lexfähre UW	633 22.01.1959	558	459	402	338 16.12.1938	
	Lexfähre OW	558 24./25.03.1947	507	468	444	430 15.03.1946	
							PNP ≈ NHN - 500 cm

Durch das Eider-Sperrwerk wird sichergestellt, dass der Wasserstand in der Tideeider nicht 700 cm, bezogen auf den PNP, überschreitet. Die MThw in der Tideeider erreichen Werte von 612 cm PNP binnen am Eider-Sperrwerk bis hin zu 632 cm PNP im Unterwasser der Anlage Nordfeld. Der Anstieg der MThw lässt sich u.a. mit dem enger werdenden Flusslauf begründen. Dies zeigt sich ebenfalls in den MTnw. Das MTnw des Außenpegels am Eider-Sperrwerk reiht sich dabei als niedrigster Wert mit 355 cm PNP in die Abfolge ein. Das MTnw an der Anlage Nordfeld liegt bei 436 cm PNP.

Auch bei den höchsten und niedrigsten gemessenen Wasserständen ist diese Abfolge erkennbar. Nur das NTnw des Beobachtungszeitraumes von 1973 bis 2015 des Pegels Nordfeld UW im Vergleich zum NTnw des Pegels Friedrichstadt Straßenbrücke weicht um niedrigere fünf Zentimeter ab. Das höchste gemessene Tidehochwasser im Mündungsbereich der Eider ab dem 26.07.1972 beträgt 1002 cm PNP.

Der mittlere Tidehub nimmt vom Eider-Sperrwerk zur Anlage Nordfeld um ca. einen Meter, von 302 cm auf 207 cm, ab.

Die Wasserstände der tidefreien Unteren Binneneider, zwischen der Anlage Nordfeld und der Schleuse Lexfähre, werden durch die beiden genannten Anlagen geregelt. Für Unterhaltungsarbeiten im Sommer und für die Entwässerung im Winter wird meist ein mittlerer Wasserstand von ca. 450 cm PNP angestrebt. Dies spiegelt sich mit 459 cm PNP in den MW der beiden Pegel Nordfeld OW und Lexfähre UW wider. Die MNW fallen in dem Beobachtungszeitraum 2006 bis 2015 bis auf Werte knapp über 400 cm PNP und die MHW steigen

in diesem Zeitraum bis auf wenige Zentimeter über 550 cm PNP an. Der höchste Wasserstand zwischen 1937 und 2015 lag mit 633 cm PNP ca. 80 cm über den MHW. Der niedrigste Wasserstand in diesem Zeitraum wurde mit 338 cm PNP am Pegel Lexfähre UW registriert.

Die mittleren Wasserstände der Oberen Binneneider, zwischen der Schleuse Lexfähre und Rendsburg, unterliegen geringeren Schwankungen und bewegen sich in dem Bereich von 444 bis 507 cm PNP. Der höchste gemessene Wasserstand in der Jahreszeitreihe 1937 bis 2015 liegt mit 558 cm PNP knapp einem halben Meter darüber und der niedrigste Wasserstand mit 430 cm PNP 14 cm unter dem MNW.

Die beiden folgenden Abbildungen, Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4, stellen beispielhaft die Beeinflussung der Tidescheitel durch das Eider-Sperrwerk in den Jahren 2016 bis 2018 dar. Hierbei können mehrere Beeinflussungen innerhalb einer Tide auftreten.

Im Jahr 2017 sind ca. 35 % der 706 Tidehochwasser in der Tideeider aufgrund des Betriebes des Eider-Sperrwerkes nicht eingetreten. In den anderen beiden Jahren waren es ca. 20 %. Hauptgründe hierfür waren der in 2017 häufigere Sielbetrieb, bei dem alle Tore zum Tideniedrigwasser geschlossen werden, der Betrieb zum Hochwasserschutz sowie der besondere Betrieb für Baumaßnahmen in der Eider und der Anlagen an den Gewässern im Einzugsgebiet. Die Betriebsarten werden im Kapitel 2.3.1 zum Eider-Sperrwerk näher erläutert. Die Flutdrosselung wurde im Schnitt bei 75 % der dem Tidehochwasser vorangehenden Flutästen durchgeführt.

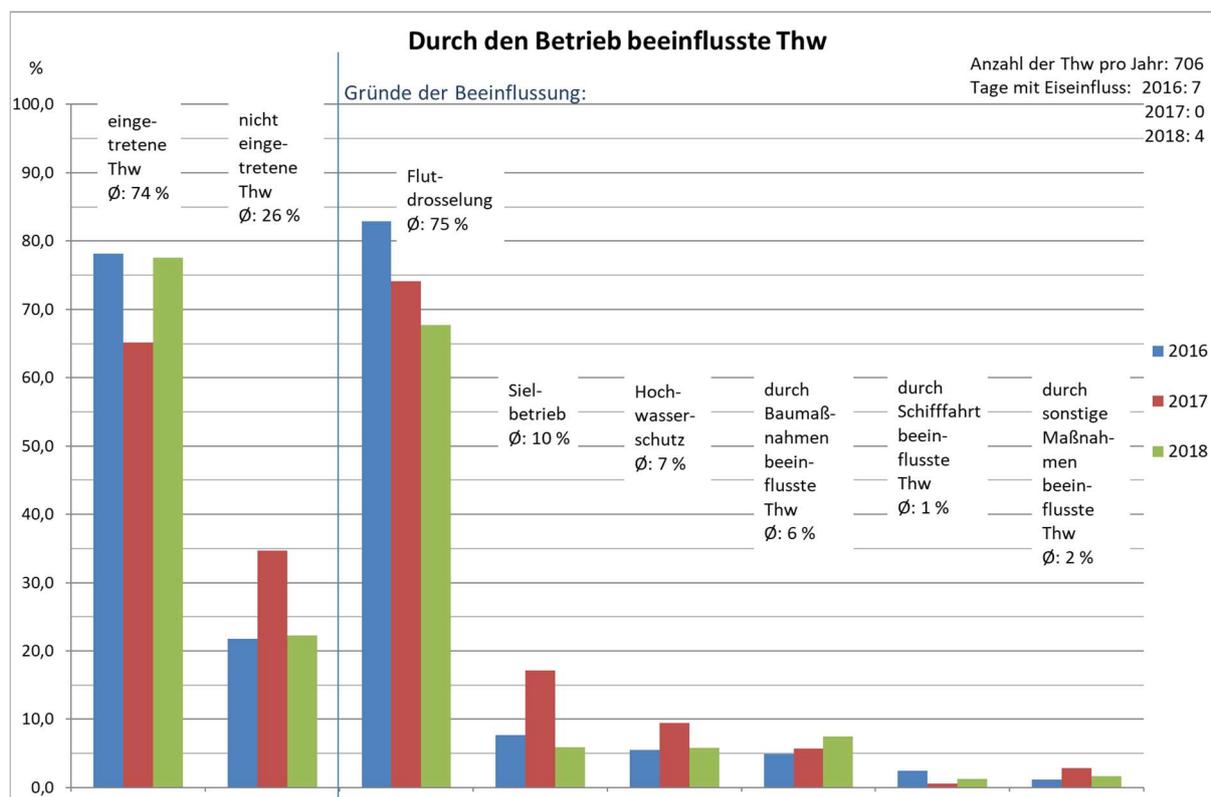


Abbildung 2-3: Betriebsstatistik des Eider-Sperrwerkes der Jahre 2016 bis 2018 bezogen auf die Thw; Quelle: WSA Elbe-Nordsee

In allen drei Jahren sind ca. 10 % der Tideniedrigwasser nicht in der Tideeider eingetreten. Hauptgründe liegen im Betrieb für Baumaßnahmen in und an den Gewässern im Einzugsgebiet und in der Schifffahrt. Bei 8 % der Tideniedrigwasser wurde die Ebbdrosselung durchgeführt.

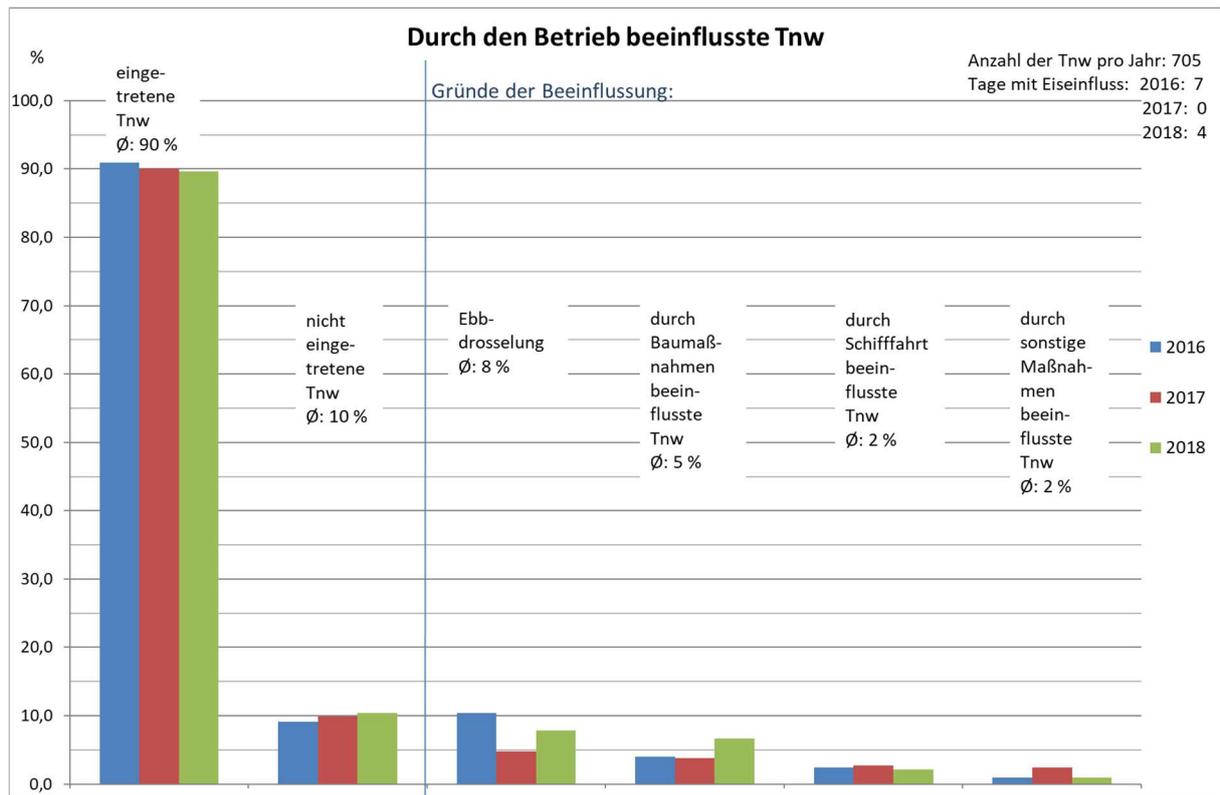


Abbildung 2-4: Betriebsstatistik des Eider-Sperrwerkes der Jahre 2016 bis 2018 bezogen auf die Tnw; Quelle: WSA Elbe-Nordsee

Der Sielbetrieb ist einer der Hauptgründe, weshalb die Flut und somit die Thw-Scheitel nicht in die Tideeider eintreten. Abbildung 2-5 gibt eine Übersicht über die getätigten Sielbetriebe von 1973 bis 2018.

Ersichtlich ist, dass in der zweiten Hälfte des aufgeführten Zeitraumes mehr Sielbetriebe durchgeführt worden sind. Herausstechend dabei sind die Jahre 2011, 2015 und 2017. Gründe hierfür sind u.a. eine veränderte Witterung, z.B. der eingetretenen Niederschläge und Winde, und eine veränderte Betriebsweise über die Jahrzehnte.

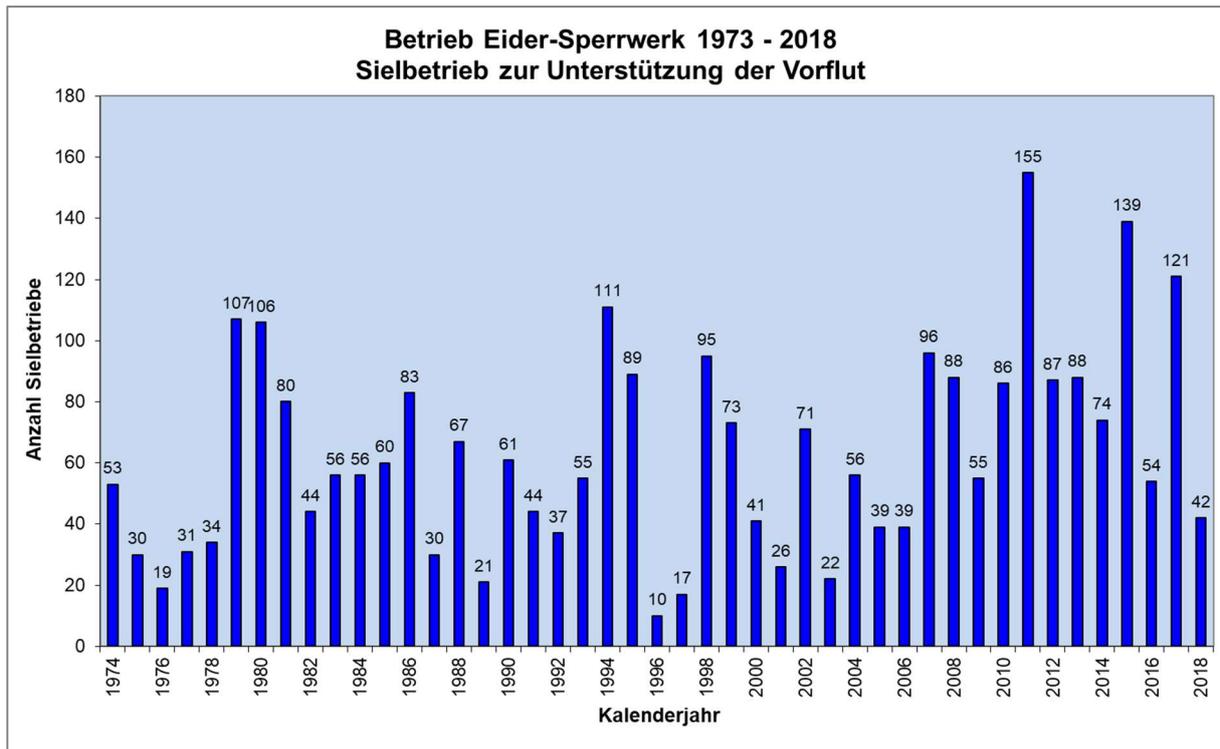


Abbildung 2-5: Anzahl des Sielbetriebes des Eider-Sperrwerkes in den Jahren von 1973 bis 2018; Quelle: WSA Elbe-Nordsee

Durch zwei Messkampagnen der BfG im Jahr 2018 und der BAW im Jahr 2020 konnten in der Außen- und Tideeider Werte zur Fließgeschwindigkeit und zum Durchfluss gewonnen werden.

Aus diesen geht hervor, dass im Bereich des Eider-Sperrwerkes im Messzeitraum maximale Fließgeschwindigkeiten, gemittelt über den Messquerschnitt, von 1,3 m/s bis 2,1 m/s erreicht worden sind (Siegmann et al. 2021b). In der Tideeiderschleife bei Wollersum oberhalb von Tönning wurden an den Messtagen zwischen 0,6 m/s bis 1,0 m/s gemessen. Unterhalb Friedrichstadts wurden parallel 0,5 bis 1 m/s registriert und oberhalb Friedrichstadts wurden im selben Zeitraum 0,4 m/s bis 1,0 m/s erfasst (Adler et al. 2018).

Damit wurden bezogen auf die jeweiligen Messzeiträume maximale Durchflüsse am Eider-Sperrwerk von 1.700 m³/s bis 2.100 m³/s (Siegmann et al. 2021b), im Bereich Wollersum von 320 m³/s bis 460 m³/s, unterhalb von Friedrichstadt 175 m³/s bis 200 m³/s und oberhalb von Friedrichstadt 150 m³/s bis 175 m³/s über den Fließquerschnitt errechnet (Adler et al. 2018).

Weitere Parameter zur Hydrologie sind im Kapitel 3.1.1 „Beschreibung des Ist-Zustandes – Grundlagenermittlung“ enthalten.

2.1.1.4 Morphologie der Eider

Von der Anlage Nordfeld fließt die Tideeider in Mäandern an Friedrichstadt vorbei nach Tönning. Dort weitet sich das Eiderästuar. Beiderseits der Hauptrinne befinden sich ausgedehnte Wattflächen. Nach insgesamt 32 km fließt die Tideeider am Eider-Sperrwerk in die Außeneider. In den Jahren nach dem Bau des Sperrwerkes vertieft sich in der Außeneider die sogenannte Nordrinne. Sie bewegt sich zudem nach Norden in Richtung des Seedeiches vor Vollerwiek (Eiderstedt). Im Sommer 1979 nähert sich die Rinne dem Deich soweit an, dass sie im Folgewinter eine Gefahr für den Deichfuß darstellt. Es wird entschieden, einen Durchstich von der Nordrinne zur Südrinne zu baggern. Das ausgebaggerte Material wird genutzt, um einen Sanddamm quer zur Nordrinne aufzuschütten und sie so abzdämmen. Es wird darauf verzichtet, die Südrinne künstlich aufzuweiten. Die Tideströmung soll die Rinne selbst freiräumen. Dadurch wird allerdings zusätzliches Sediment in die Tideeider eingetragen. Um das zu minimieren, wird ab Dezember 1979 der flutgedrosselte Sperrwerksbetrieb eingeführt.

Im Rahmen des Projektes hat der LKN.SH seine Eider- und Wattgrundkarten digitalisieren lassen. Sie stehen jetzt als über 100 historische Höhenmodelle zur Verfügung. Sie wurden von der BAW GIS-gestützt ausgewertet. Es wurde untersucht, wie sich die Morphologie der Außen- und Tideeider seit dem Bau des Eider-Sperrwerkes verändert hat (Siegmann et al. 2023). Abbildung 2-6 zeigt den im Rahmen der Auswertungen berechneten morphologischen Raum der Außen- und Tideeider. Der morphologische Raum wird auch als bed elevation range (BER) bezeichnet und errechnet sich vereinfacht wie folgt (Kösters und Winter 2014):

$$BER = MAX(z(t)) - MIN(z(t))$$

mit:

MAX (z(t)) = Maximale Geländehöhe z an einem Punkt innerhalb eines Zeitraums t

MIN (z(t)) = Minimale Geländehöhe z an einem Punkt innerhalb eines Zeitraums t

Der morphologische Raum ist also die Spanne aller Geländehöhen in einem Betrachtungszeitraum. Er veranschaulicht, wie stark sich die Topographie verändert.

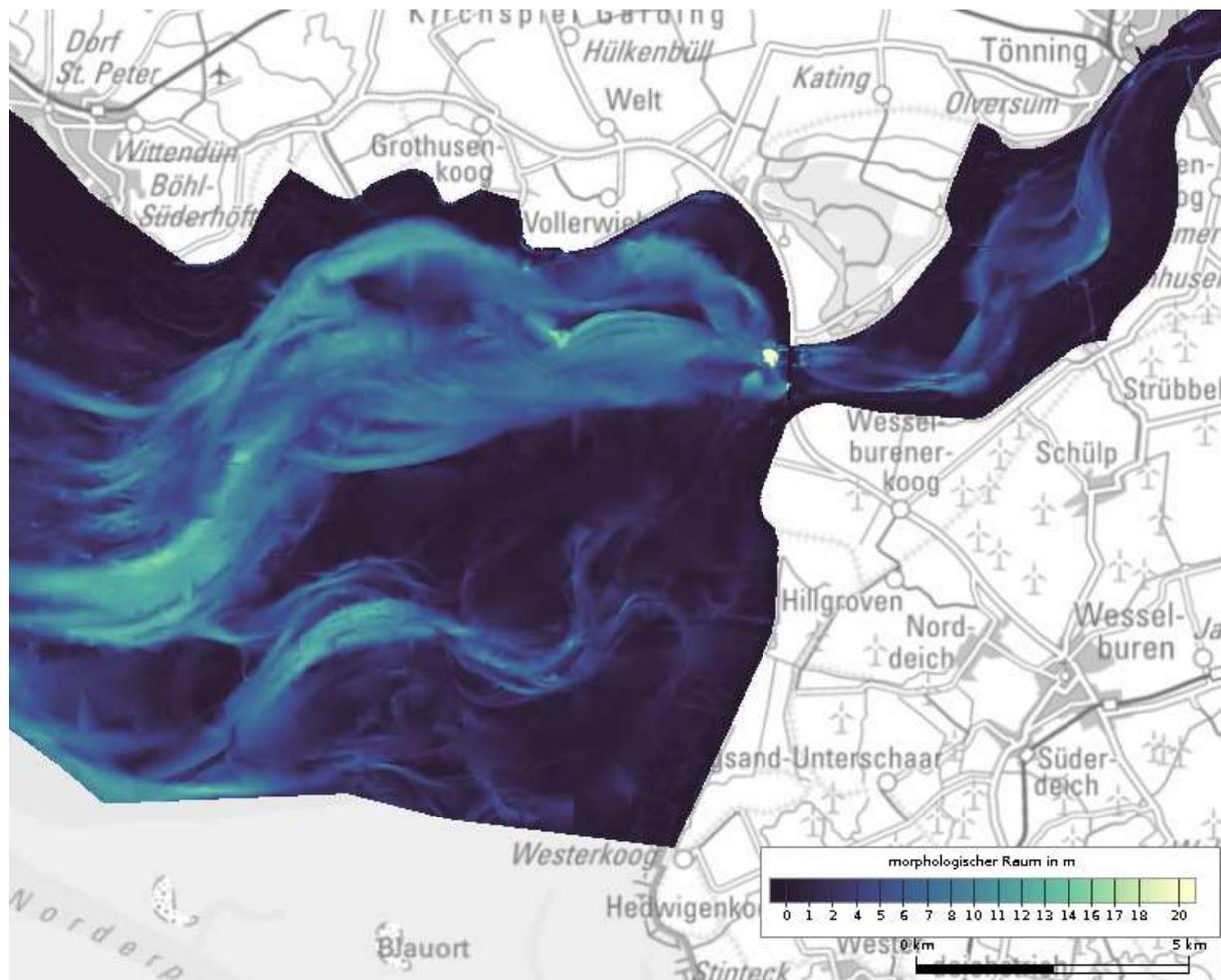


Abbildung 2-6: Morphologischer Raum der Außen- und Tideeider, berechnet aus den historischen Höhenmodellen des LKN.SH ab 1972 und des DGM-W 2016/2017, Hintergrundkarte DTK250 © GeoBasis-DE / BKG (2023)

In Abbildung 2-6 sind helle Bereiche dargestellt, in denen sich die Geländehöhen stark verändert haben, beispielsweise die seeseitigen Kolke beim Eider-Sperrwerk, und dunkle Bereiche mit geringen Veränderungen. Der morphologische Raum zeigt, dass die Eider nach wie vor morphologisch sehr aktiv ist, in höherem Maße in der Außeneider, in geringerem Umfang in der Tideeider. Weitere Ergebnisse können dem Bericht der BAW entnommen werden.

2.1.2 Die Treene

2.1.2.1 Allgemeines zur Treene

Die Treene hat ein Einzugsgebiet von 794 km² (vgl. Abbildung 2-1). Sie ist damit der größte Nebenfluss der Eider. Den Oberlauf der Treene bildet die Bondenau, welcher südöstlich von Sörup in der Region Angeln entspringt und zusammen mit der Kielstau in den Treßsee mündet. Ursprünglich mündete auch die Kielstau direkt in den Treßsee, sodass

der Treßsee historisch als Ursprung der Treene angesehen wird. Der Oberlauf der Treene durchfließt das Naturschutzgroßprojekt ‚obere Treenelandschaft‘.

Die Treene hat eine Länge (einschließlich Bondenau) von 98,1 km. Die größten Nebenflüsse der Treene sind die Jerrisbek, Bollingstedter Au (größtes Einzugsgebiet), Silberstedter Au und Rheider Au.

Die Treene ist von der Mündung bei Friedrichstadt bis Schwabstedt schiffbar.

Der Unterlauf der Treene ist zwischen Friedrichstadt und der Ortslage Hollingstedt auf der Höhe der Einmündung der Silberstedter Au beidseitig eingedeicht. Das Deichvorland weist dabei Breiten zwischen 100 und 500 m aus, welches im Hochwasserfall als Retentionsspeicher dient (siehe auch Kapitel 2.3.4). Ebenfalls befinden sich längsseitig der Treene eine Reihe von Poldern, die zur Hochwasserentlastung in Friedrichsstadt beitragen können. Der Polder (Schwabstedter) Westerkoog mit einem Volumen von ca. 3,9 Mio. m³, Polder Stapel (auch Polder Norderstapel genannt) mit einem Volumen von ca. 3,5 Mio. m³ und Polder Winnert mit einem Volumen von ca. 4,5 Mio. m³.

Die Treene mündet in Friedrichstadt und wird über die dortigen Siele und die Schleuse in die Eider entwässert (siehe Kapitel 2.3.3).

Die Mündung der Treene wurde Ende des 16. Jhdt. um mehrere Kilometer stromauf verlegt, um das Fließgefälle zu optimieren. Bei der Stadtgründung Friedrichstadts 1621 wurde den Problemen bei der Gründung der Häuser mit in den Boden getriebenen Holzpfählen begegnet. Das hat zur Folge, dass der Wasserstand mit einem Staulevel (Grenzwasserstand) permanent eingehalten werden muss, damit dem mikrobiellen Abbau der Träger entgegengewirkt wird (Beitrag Herr Neemann, GDWS Kiel am 27.04.2023).

Die Grenzwasserstände stehen im Verhältnis mit dem Baugrund und der Höhe der Besiedlung. Während der Niedrigwassergrenzstand ca. 1810 durch die dänische Monarchie festgelegt wurde, besitzen die anderen Grenzwerte nur temporäre Gültigkeit (die Werte ändern sich mit dem Personalwechsel). Der ursprüngliche obere Grenzwasserstand beläuft sich auf 5,45 m PNP bis 5,50 m PNP in Friedrichstadt an der Treene. Die zulässigen Grenzen der Wasserstände in Friedrichstadt betragen heute bei Hochwasser zwischen 5,25 m PNP bis 5,30 m PNP und für das Niedrigwasser 4,16 m PNP. Im Sommer soll der Wasserstand der Treene nicht über 5,05 m PNP liegen, da ein Fremdenverkehrsschiff noch durch die innerstädtischen Schleusen fahren möchte. Die Stadttore werden üblicherweise ab 5,05 m PNP geschlossen (Beitrag Herr Neemann, GDWS Kiel am 27.04.2023).

2.1.2.2 Hydrologie der Treene

Das Abflussgeschehen der Treene ist durch die verschiedenen Naturräume bzw. Fließgewässerlandschaften (siehe z.B. Abbildung 3-1) geprägt. Aus dem östlichen Hügelland kommend fließt die Treene durch die Geest, entlang der flachen Niederungsgebiete in die Marsch. Die Entwässerung der Niederungen (unter 2,5 m NHN) erfolgt in erster Linie über Schöpfwerke. Die hinter den Niederungen gelegenen höheren Bereiche der Geest werden teilweise über eine direkte Anbindung in die Treene entwässert, über die sog. Geestwasserdurchleiter. In freier Vorflut fließt der unteren Treene das Wasser aus dem sich nördlich der Ortschaft Treia gelegenen Einzugsgebiet zu. Der Abfluss aus der unteren Treene in die Eider wird über die Schleusen bzw. Siele in Friedrichstadt gesteuert. Entwässert werden kann dabei nur, wenn die tidebeeinflussten Wasserstände in der Eider niedriger sind als die Wasserstände in der Treene (siehe Kapitel 2.3.3). Die Wasserstände der unteren Treene sind daher durch die Steuerung beeinflusst, was zu einem Rückstau bis mindestens Hollingstedt führt.

Der Abfluss wird an verschiedenen Pegel im Einzugsgebiet erfasst (siehe Kapitel 3.2). Im Folgenden werden für eine Auswahl der Pegel die wichtigsten hydrologischen Kennwerte der Treene und ihrer Nebengewässer dargestellt (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Hydrologische Hauptwerte ausgewählter Pegel der Treene sowie ihrer Nebengewässer

Pegel	Gewässer	WWJ	NQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]	MQ [m ³ /s]	MHQ [m ³ /s]	HQ [m ³ /s]	EZG [km ²]
Bodebrück	Treene / Bodenau	2003- 2021	0,00 (04.08.2020)	0,01	0,17	1,32	2,31 (02.02.2016)	20,31
Soltfeld	Kielstau	1987- 2021	0,01 (28.09.1996)	0,05	0,44	2,70	4,56 (06.11.1998)	48,00
Sol- lerupmühle	Jerrisbek	1975- 2021	0,01 (27.07.1976)	0,35	1,12	6,97	14,0 (24.12.2014)	84,27
Esperstoff- feld	Bollingste- dter Au	1980- 2018	0,07 (05.10.1989)	0,20	1,42	6,14	12,6 (01.01.1982)	98,90
Treia	Treene	1985- 2021	0,48 (09.08.1994)	1,83	6,46	28,10	56,6 (24.12.2014)	480,72
Dörpstedt	Rheider Au	1997- 2018	0,13 (20.07.2006)	0,26	0,85	3,55	6,75 (24.12.2014)	57,65
Fried- richstadt	Treene	2003- 2021	-3,19* (27.07.2013)	-1,97*	11,00	112,00	134 (17.03.2018)	794,40

*negative Werte durch Wechsel der Fließrichtung

Im Einzugsgebiet der Treene befinden sich eine Reihe von Seen. Zu den größten Seen gehören der Arenholzer See, Südensee und Sankelmarker See. Durch ihre großen Einzugsgebiete geprägt, können daneben noch der Treßsee sowie der gesteuerte Bollingstedter Mühlenteich genannt werden.

2.1.3 Die Sorge

Das Einzugsgebiet der Sorge umfasst 415 km² (vgl. Abbildung 2-1). Die Sorge hat zwei Hauptquellflüsse, die Stente und die Mühlenau. Ab der Vereinigung der Hauptquellflüsse misst die Sorge bis zur Mündung in die Eider eine Länge von 29,4 km. Die Gesamtlänge der Sorge inklusive der Stente, welche von ihrer Quelle bis zur Mündung noch den Bistensee durchquert, beträgt 42,5 km. Die Sorge mündet in der Nähe von Friedrichsgraben in die Eider.

Von dem Zusammenfluss aus gemessen, ist das Einzugsgebiet der Sorge größer als das der Eider. Der Querschnitt der Sorge ist jedoch wesentlich kleiner als der der Eider.

An der Mündung der Sorge in die Eider, unterhalb des Schöpfwerkes Sandschleuse, findet an der verpachteten Bundesfläche, am linken Ufer Anlandung, am rechten Ufer dagegen Erosion statt. Die Ausbautiefe der Sorge erfolgte 1938 bei NN -2,5 m. (Beiträge Herr Neeemann, GDWS Kiel am 27.04.2023).

Der Bereich Sorgbrück liegt im Übergang von der Geest zur Niederung. Am Pegel Sorgbrück fließt der Oberlauf der Sorge noch im freien Gefälle ab. Die Hauptwerte des Pegels sind in der folgenden Tabelle 2-3 aufgelistet:

Tabelle 2-3: Hydrologische Hauptwerte der Sorge

Pegel	Gewässer	WWJ	NQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]	MQ [m ³ /s]	MHQ [m ³ /s]	HQ [m ³ /s]	EZG [km ²]
Sorgbrück	Sorge	1971-2020	0,04 (21.07.1992)	0,51	1,65	8,35	15,5 (08.03.1981)	131,44

Unterhalb des Pegels Sorgbrück verläuft die Sorge in einer Umleitung mit der Bennebek in einem gemeinsamen Bett. Die Umleitung erfolgte aufgrund einer Trockenlegung im Niederungsgebiet der Sorge im 17. Jahrhundert. Bei der Trockenlegung wurde der Meggerkoog, welcher einmal ein Flachsee war, eingedeicht und entwässert. Der so entstandene Koog ist mit über -2,00 m NHN tief und wird über das Schöpfwerk Fünfmühlen entwässert.

Zwischen Sorgbrück und dem Schöpfwerk Sandschleuse wird die Sorge als Neue Sorge betitelt. Die Sandschleuse ist in der Nähe der „Alten Sorge-Schleife“ gelegen. Über das Schöpfwerk wird die Neue Sorge in die Sorge gepumpt.

Die Alte Sorge (Sorgekoog) ist ein Altarm der Sorge, welcher vom Flusslauf abgetrennt ist. Das Einzugsgebiet der Alten Sorge umfasst 117,5 km². In dem Einzugsgebiet liegt das Naturschutzgebiet „Alte Sorge-Schleife“, welches 7,58 km² umfasst und geprägt ist durch wechselfeuchte Grünländereien und Hochmoore. Der Sorgekoog entwässert über zwei Schöpfwerke an der Steinschleuse in die Eider.

2.2 Charakteristik des Eider-Einzugsgebietes

2.2.1 Klima und Wasserhaushalt

2.2.1.1 Klima

Die wesentlichen das Klima charakterisierenden Elemente sind Lufttemperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer (Müller-Westermeier et al., 1999). Weitere, insbesondere für die Berechnung der nicht direkt messbaren Verdunstung notwendigen Größen sind die Globalstrahlung, der Dampfdruck bzw. die Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit. Die Windrichtung beeinflusst zudem binnenseitig durch Windstau die Entwässerungsleistung der Gräben, der Eider und der Treene. Seeseitig prägt der Wind neben der astronomischen Tide die Tidehoch- und -niedrigwasserstände.

Das Eidergebiet gehört zum warm-gemäßigten Regenklima der mittleren Breiten. Mit überwiegend westlichen Winden werden das ganze Jahr über feuchte Luftmassen vom Atlantik und weiter über die Nordsee herangeführt, die zu vergleichsweise hohen Niederschlägen mit Jahressummen von 750 mm bis 1000 mm (Abbildung 2-7) führen.

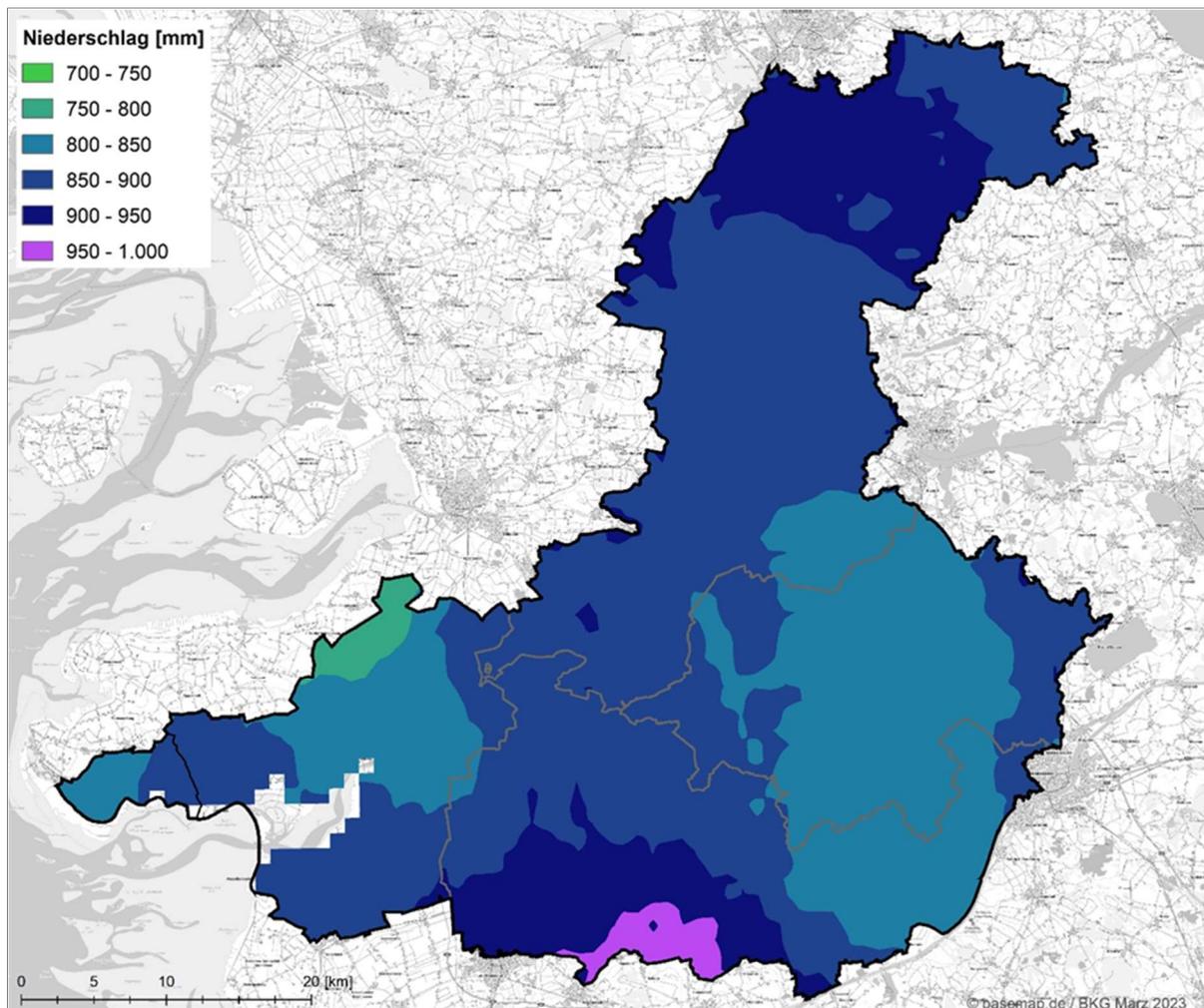


Abbildung 2-7: Mittlere jährliche Niederschlagssumme im Zeitraum 1991-2020; Datengrundlage: DWD, HYRAS-PRE

Der ozeanische Einfluss sorgt trotz der nördlichen Lage für relativ milde Winter und nicht zu heiße Sommer (Abbildung 2-8). Gelegentlich wird die Westströmung der Luft jedoch durch zum Teil recht langlebige Hochdruckgebiete blockiert. In diesem Fall kann es zu sehr kalten Wintern kommen, die Sommer können warm und trocken ausfallen.

Die räumliche Temperatur- und Niederschlagsverteilung ist vorwiegend durch die Nähe zu Nord- bzw. Ostsee sowie durch die Hohe Geest und das Östliche Hügelland gegeben. Von Westen heranströmende Meeresluftmassen führen orographisch bedingt zu deutlich höheren Niederschlägen in der Geest und im Hügelland als in den Küstenzonen. Dies gilt vor allem in den Wintermonaten. Im meteorologischen Sommer ist diese räumliche Verteilung, bei insgesamt höheren absoluten Niederschlägen weniger stark ausgeprägt (vgl. Abbildung 2-7 bis Abbildung 2-8). Die klimatischen Gradienten (räumlichen Unterschiede) der Klimaelemente sind insgesamt jedoch nur vergleichsweise schwach ausgeprägt.

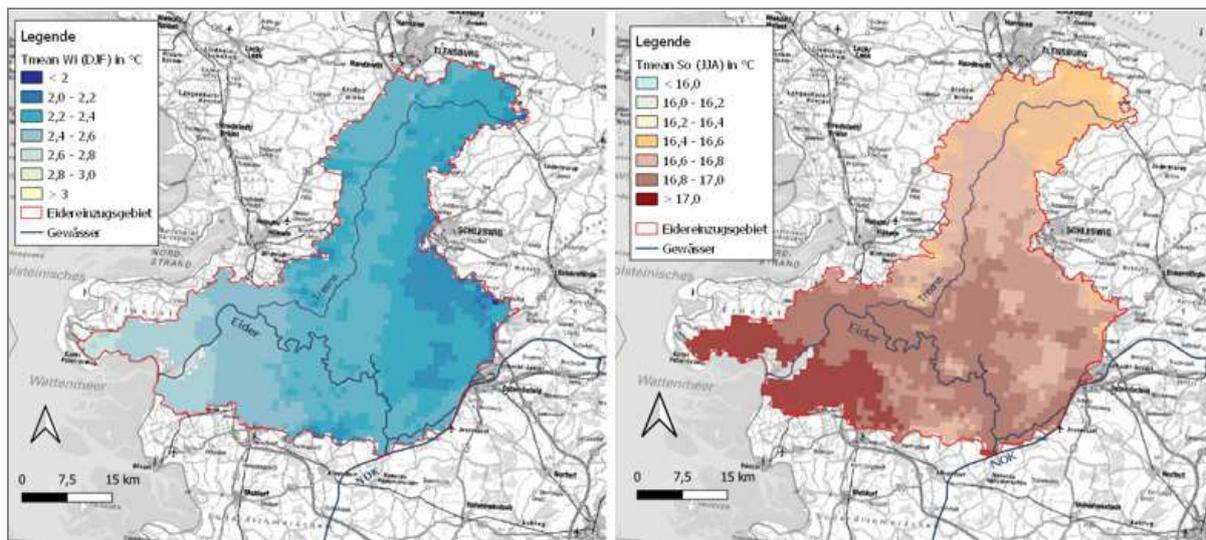


Abbildung 2-8: Mittlere Lufttemperatur im Winter (Dezember, Januar, Februar; links) und Sommer (Juni, Juli, August; rechts) der Zeitreihe 1961-90 im Eidergebiet; Datenquelle: DWD

Der starke Wind (Abbildung 2-9), die kühlende Wirkung und die insgesamt nördliche Lage geben auch den Küsten der Nordsee im Sommer ein raues Klima. Zudem führt die in nordwestlicher Richtung verlaufende Nordseeküste Schleswig-Holsteins öfter zu Situationen mit Wolkenverdichtung in konvergenter (zusammenlaufender) Strömung, der s.g. Küstenkonvergenz, während gleichzeitig im Bereich der Ostsee eher Küstendivergenz (auseinanderlaufende Strömung) mit Wolkenauflösung einsetzt. Im Winter ist das Klima an den Küsten aufgrund des wärmenden Wassers zwar mild, wird aber durch die hohen Windgeschwindigkeiten doch als rau empfunden.

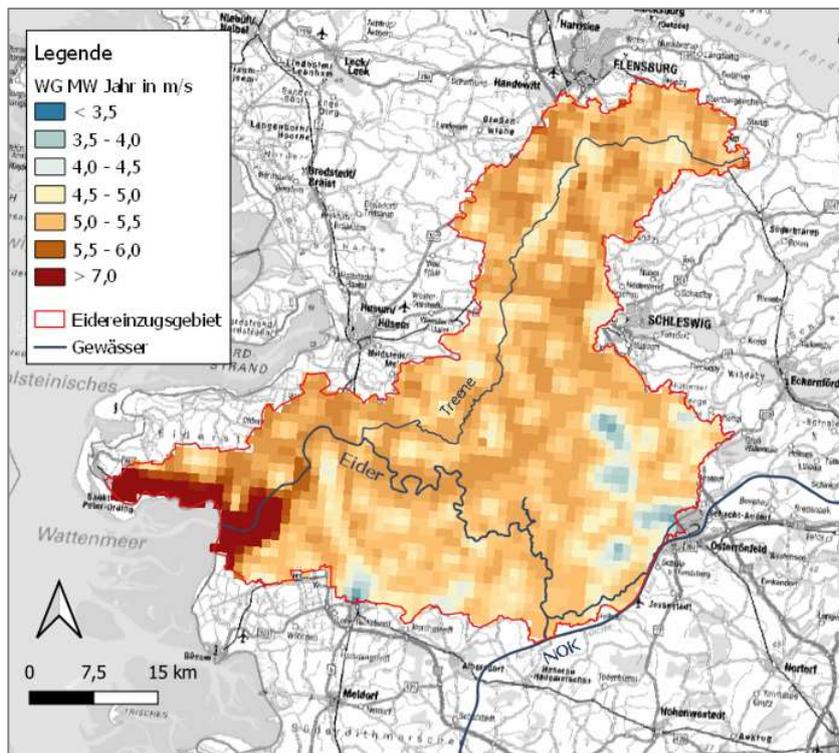


Abbildung 2-9: Mittlere Windgeschwindigkeit (ohne Berücksichtigung der Landnutzung) im Jahresmittel der Zeitreihe 1961-90 im Eidergebiet; Datenquelle: DWD

Im Frühling und Frühsommer stabilisieren die noch kalten Wasserflächen von Nord- und Ostsee die thermische Schichtung der Luft und reduzieren die Intensität konvektiver Niederschläge. Die Witterung ist relativ trocken und sonnig was u.a. zu den im Mittel besonders hohen Sonnenscheinwerten an der Ostseeküste beiträgt. Teilweise kann sich über dem kalten Wasser auch langanhaltender Nebel bilden.

Neben den Jahresmittelwerten der klimatologischen Größen ist die Häufigkeit des Auftretens verschiedener meteorologischer Phänomene sowie die Anzahl der Tage, an denen bestimmte Schwellenwerte über- bzw. unterschritten werden, von besonderer Bedeutung. Für den Niederschlag sind dies die Anzahl der Tage mit einem Niederschlag von mindestens 1 mm bzw. von mindesten 10 mm und mehr. Im Eidergebiet herrscht eine einheitliche Verteilung beider Kennwerte mit 130 bis 140 Tagen für die Anzahl der Niederschlagstage (≥ 1 mm) und 20 bis 25 Tage für die Tage mit einem Niederschlag von ≥ 10 mm.

Die jahreszeitliche Variabilität der Klimaelemente zeigt sich in den vieljährigen Mittelwerten der Monatssummen bzw. -mittel von Niederschlagshöhe (RR), der bodennahen Lufttemperatur (T2M), der maximalen monatlichen Tagesniederschlagshöhe (RS), der Windstärke (WS) sowie der Sonnenscheindauer (Sd) und des Wolkenbedeckungsgrad (NW) an der Klimastation Schleswig für die Zeitreihe 1991 bis 2020 (Abbildung 2-10).

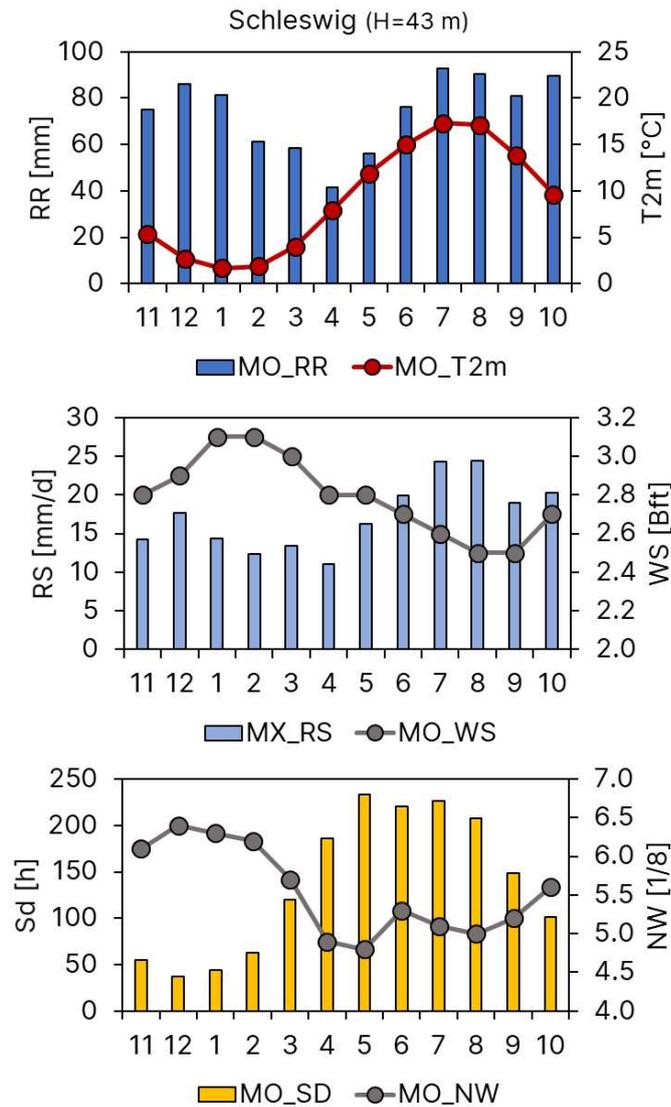


Abbildung 2-10: Jahreszeitliche Verteilung (Monatsmittel bzw. -summen) von Niederschlagshöhe (RR) und Lufttemperatur (oben), maximale Tagesniederschlagshöhe (RS) und Windstärke (WS) (Mitte) sowie Sonnenscheindauer (Sd) und Wolkenbedeckungsgrad (NW) an der Klimastation Schleswig für die Zeitreihe 1991-2020; Datenquelle: DWD

2.2.1.2 Wasserhaushalt

Für den Abfluss bzw. insgesamt den Wasserhaushalt betreffende Fragestellungen stellt der Niederschlag und hierbei insbesondere sein Extremverhalten hinsichtlich der Andauer der Trocken- und Feuchtperioden sowie der Stärke der Extremniederschlagsereignisse verschiedener Dauerstufen zusammen mit der räumlichen Ausdehnung den wichtigste Einflussfaktor dar (vgl. Kapitel 2.2.1.1). Darüber hinaus kommt auch der Verdunstung, die neben den meteorologischen Faktoren wesentlich durch die Landnutzung und die Bodeneigenschaften geprägt wird, eine große Bedeutung zu.

Tetzlaff et. al. (2017) haben mit dem Modell GROWA im Einzugsgebiet der Eider reale Verdunstungshöhen zwischen 450 und 600 mm/a (1971-2000) ermittelt. Besonders in den Tieflandregionen der Geestniederungen konnten aufgrund der hohen Wasserverfügbarkeit der Böden auch reale Verdunstungshöhen von über 700 mm/a berechnet werden. Durch die stetige Nachlieferung von Wasser durch die hohen Grundwasserstände sind die jeweiligen nutzungsspezifischen Maximalwerte möglich. Abbildung 2-11 zeigt die Verteilung des Grund- und Stauwassereinflusses sowie den Grundwasserflurabstand, abgeleitet aus der BÜK250, im Einzugsgebiet als entscheidende Faktoren für die real verfügbare Menge an Wasser im Boden. Gut zu erkennen sind die geringen Flurabstände und der Grundwassereinfluss in den Niederungen.

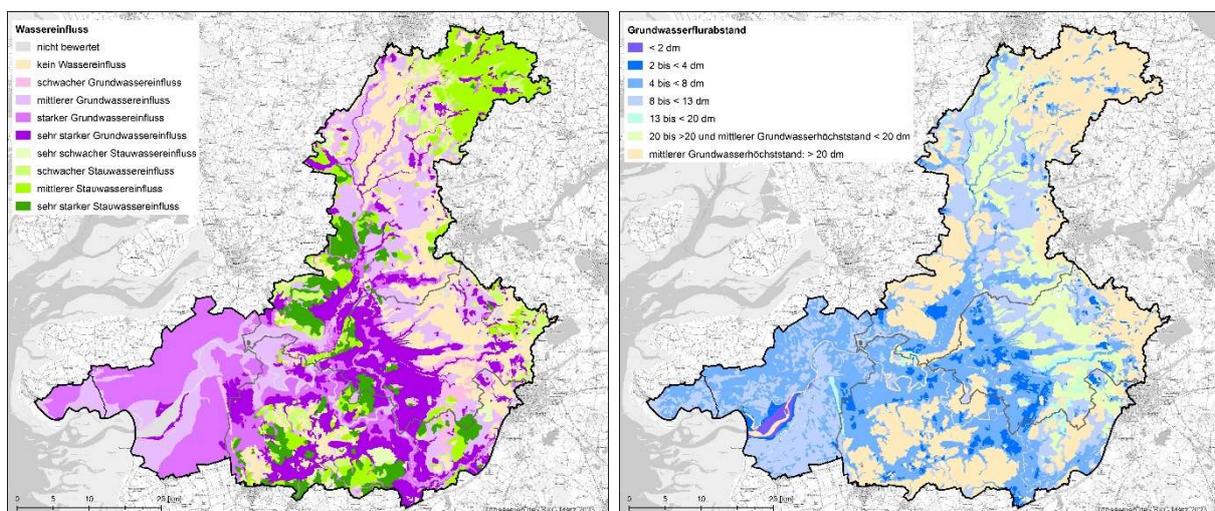


Abbildung 2-11: Links: Übersichtskarte des Grund- und Stauwassereinflusses. Kartengrundlage: Leitböden der BÜK250 (LfU 2018, unveröffentlicht). Rechts: Bodenkundlicher Grundwasserflurabstand; Kartengrundlage: Leitböden der BÜK250, LfU 2022

Einfluss auf die Verdunstungsraten haben die hohen Anteile von landwirtschaftlichen Flächen bzw. Grünland und Wald im Einzugsgebiet (siehe Kapitel 2.2.2).

Im neuen Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD 2003) wurden ebenfalls die reale bzw. tatsächliche Verdunstung sowie die Abflusshöhe berechnet. Die sich für das Eidergebiet ergebenden Karten sind in Abbildung 2-12 dargestellt. Die Werte sind unter Beachtung der bei Wasserhaushaltsuntersuchungen herrschenden Unsicherheiten und der Unterschiede in den betrachteten Zeitreihen vergleichbar.

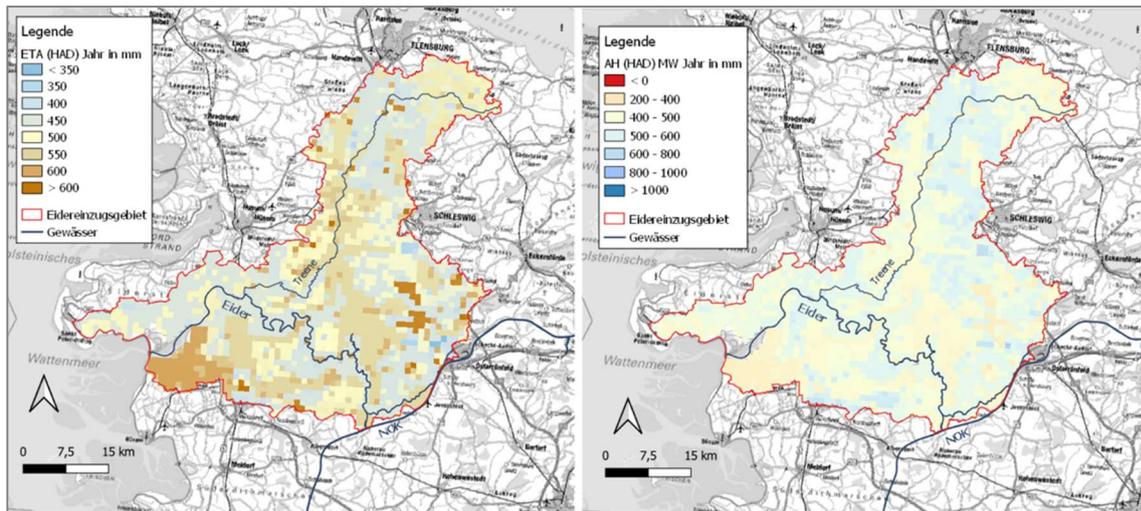


Abbildung 2-12: Mittlere tatsächliche Verdunstungshöhe (ETA) und Abflusshöhe (AH) der Zeitreihe 1961-1990; Datengrundlage: HAD 2003

Die Gesamtabflussraten im langjährigen Mittel (1971-2000) liegen im Eider-Einzugsgebiet nach Tetzlaff et. al. (2017) bei Werten von 300 bis 400 mm/a im Bereich der Geest, insbesondere im Teileinzugsgebiet der Treene teilweise auch über 400 mm/a. Der langjährige mittlere Abfluss des Pegels Treia beispielhaft liegt bei 424 mm/a. Durch die hohen Verdunstungsraten in den Niederungen liegen die Abflussraten hier deutlich reduziert, sodass diese auch unter 100 mm/a aufweisen können. Weitere Informationen zum Abflussgeschehen bzw. zur Hydrologie sind auch aus dem Kapitel 2.1 zu entnehmen.

Tetzlaff et. al. (2017) haben für das Einzugsgebiet der Eider ebenfalls mittlere Grundwasserneubildungsraten im Bereich von 25 bis 250 mm/a (1971-2000) berechnet. Insbesondere in Teilen der Geest können diese auch >250 mm/a betragen, was in etwa den ermittelten Sickerwasserhöhen entspricht. Da ein großer Teil der nicht verdunstenden Wassermenge ungehindert dem Aquifer zusickern kann, sind Geestgebiete auch die grundwasserreichsten Gebiete Schleswig-Holsteins. In den Gebieten mit hohen Direktabflussanteilen durch natürlichen Zwischenabfluss oder künstliche Entwässerung (z.B. Marsch) sind die Grundwasserneubildungshöhen entsprechend geringer.

2.2.2 Landnutzung

Abbildung 2-13 zeigt die Verteilung der sechs Hauptlandnutzungsarten / Landbedeckungskategorien im Einzugsgebiet. Das Gebiet wird zu ca. 77 % und somit primär landwirtschaftlich genutzt, dazu gehören sowohl Acker- als auch Grünlandflächen. Darauf folgend fallen ca. 10 % des Gebiets auf Siedlungsbau und Waldflächen ab. Die Flächen mit weiterer Vegetation sind hauptsächlich Moore, Sümpfe und Gehölz. Die originalen Daten enthalten 25 Landnutzungsarten / Landbedeckungskategorien, die entsprechend der Modellanforderungen hydrologisch sinnvoll zusammengefügt wurden.

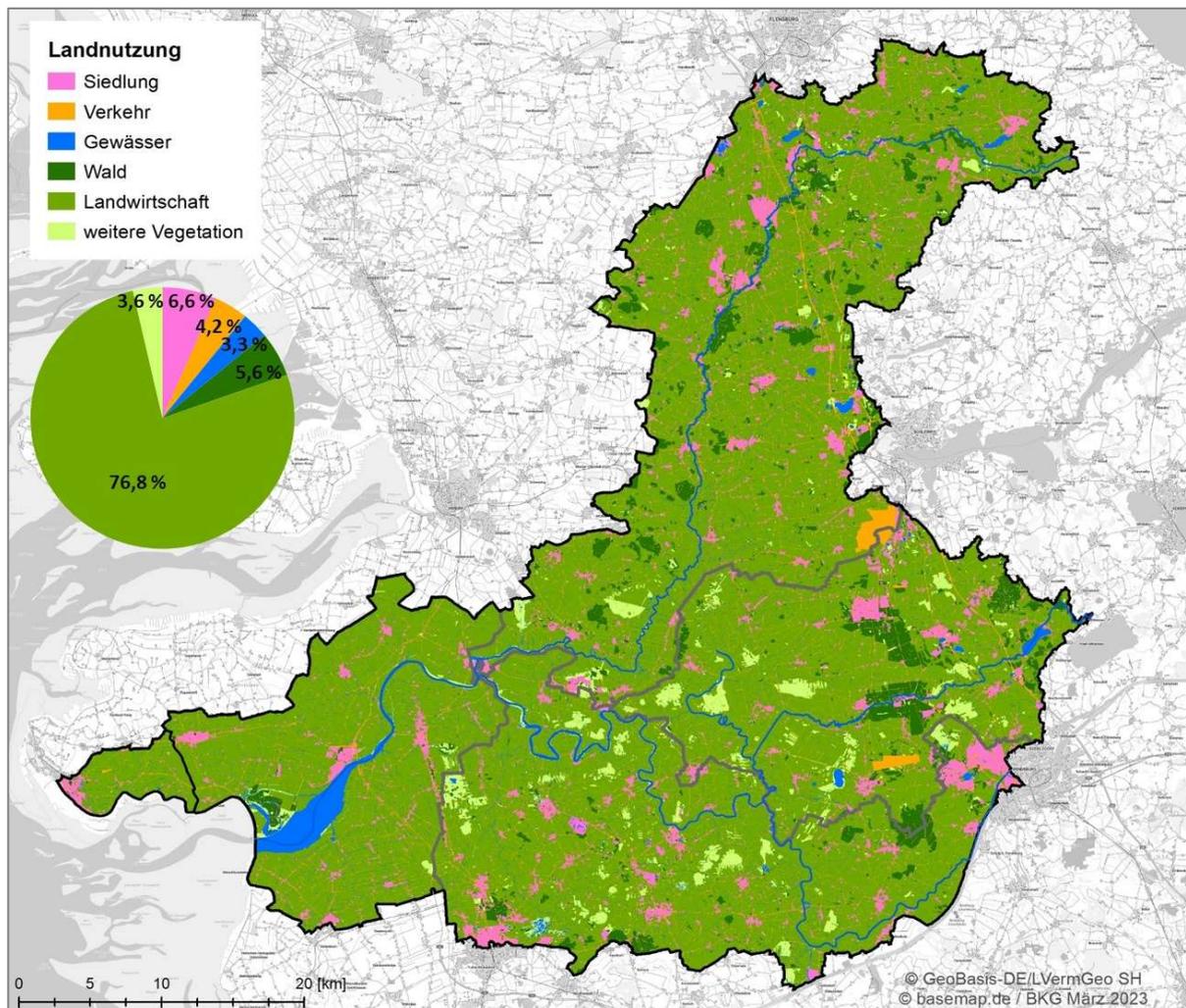


Abbildung 2-13: 6 Hauptkategorien der Landnutzung / Landbedeckung und deren prozentualer Anteil; Datengrundlage: ALKIS (© GeoBasis-DE/LVermGeo, Stand: 2022)

2.2.3 Boden und Geologie

Im Einzugsgebiet der Eider werden ca. zwei Drittel der in Schleswig-Holstein vorkommenden 19 Leitbodentypen abgedeckt. Abbildung 2-14 zeigt auf der Grundlage der Bodenübersichtskarte 1:250.000 (BÜK250) die Verteilung der Leitbodentypen. Die Bodenübersichtskarte dient zur Ableitung der erforderlichen Bodenparameter für die Modellierung. Abbildung 2-15 zeigt die entsprechenden dominierenden Bodenartenschichtungen.

In den Marschen finden sich schluffige (Kalk- und Kleimarschen) bis schluffig-tonige (Dwogmarschen) Ablagerungen. Die Hohe Geest, insbesondere in den Teileinzugsgebieten der Treene und Sorge, wird von sandigen Braunerden und deren Übergängen zum Podsol geprägt. Im Gebiet der niederen Geest sind überwiegend Gleye und Podsole aus sandigen Schmelzwasserablagerungen der letzten Vergletscherung (Weichsel-Kaltzeit) zu finden. Schließlich dominieren im östlichen Hügelland (Jungmoränengebiet) der Einzugsgebiete der Treene und Sorge Parabraunerden und deren Übergänge zu den Pseudogleyen aus

sandig-lehmigen Ablagerungen. Niedermoore und Hochmoore finden sich besonders im Übergang von der Marsch zur Geest, kommen aber stellenweise auch in den anderen Hauptnaturräumen vor (LLUR 2019).

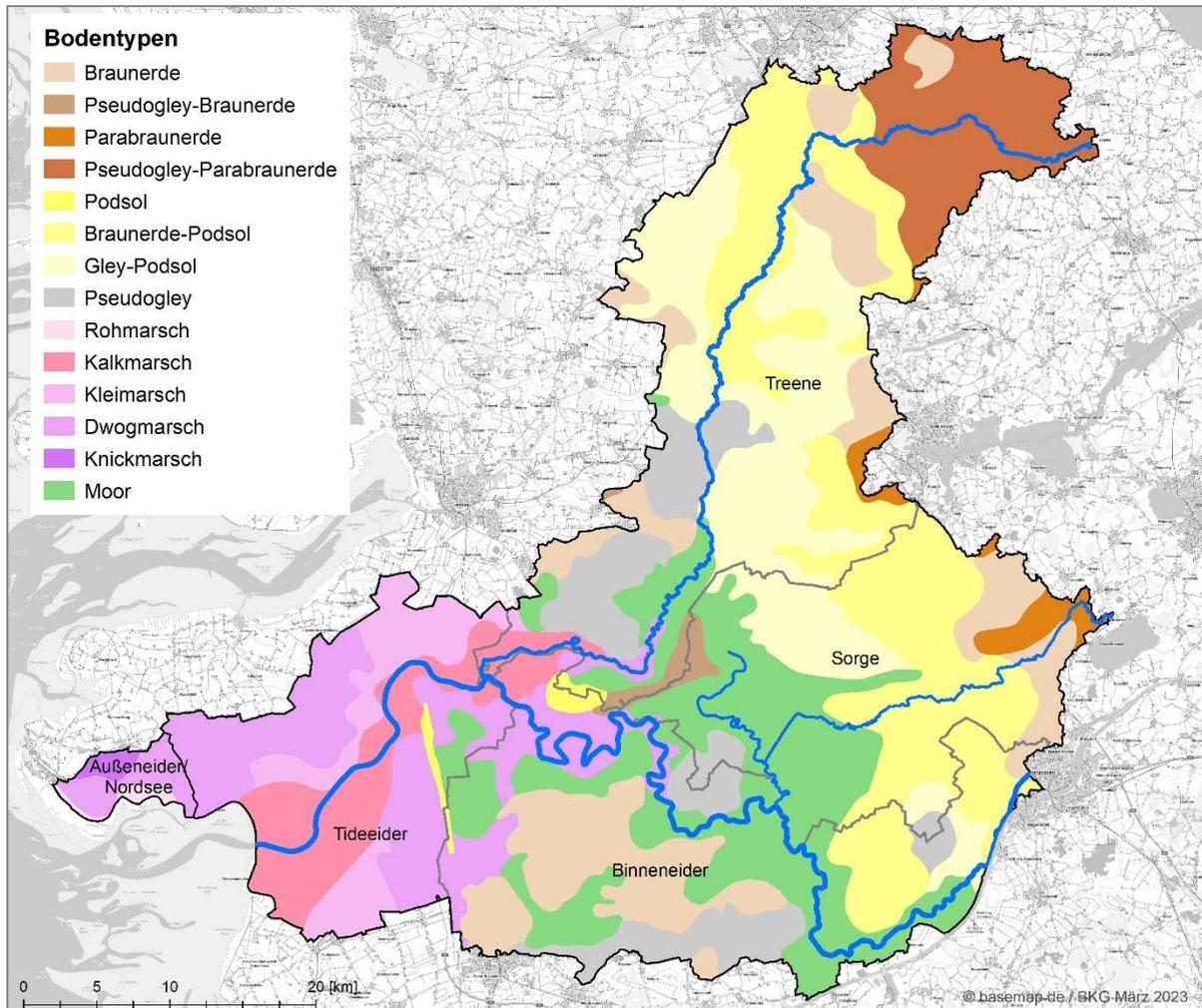


Abbildung 2-14: Vereinfachte Karte der Leitbodentypen; Datengrundlage BÜK250, LfU

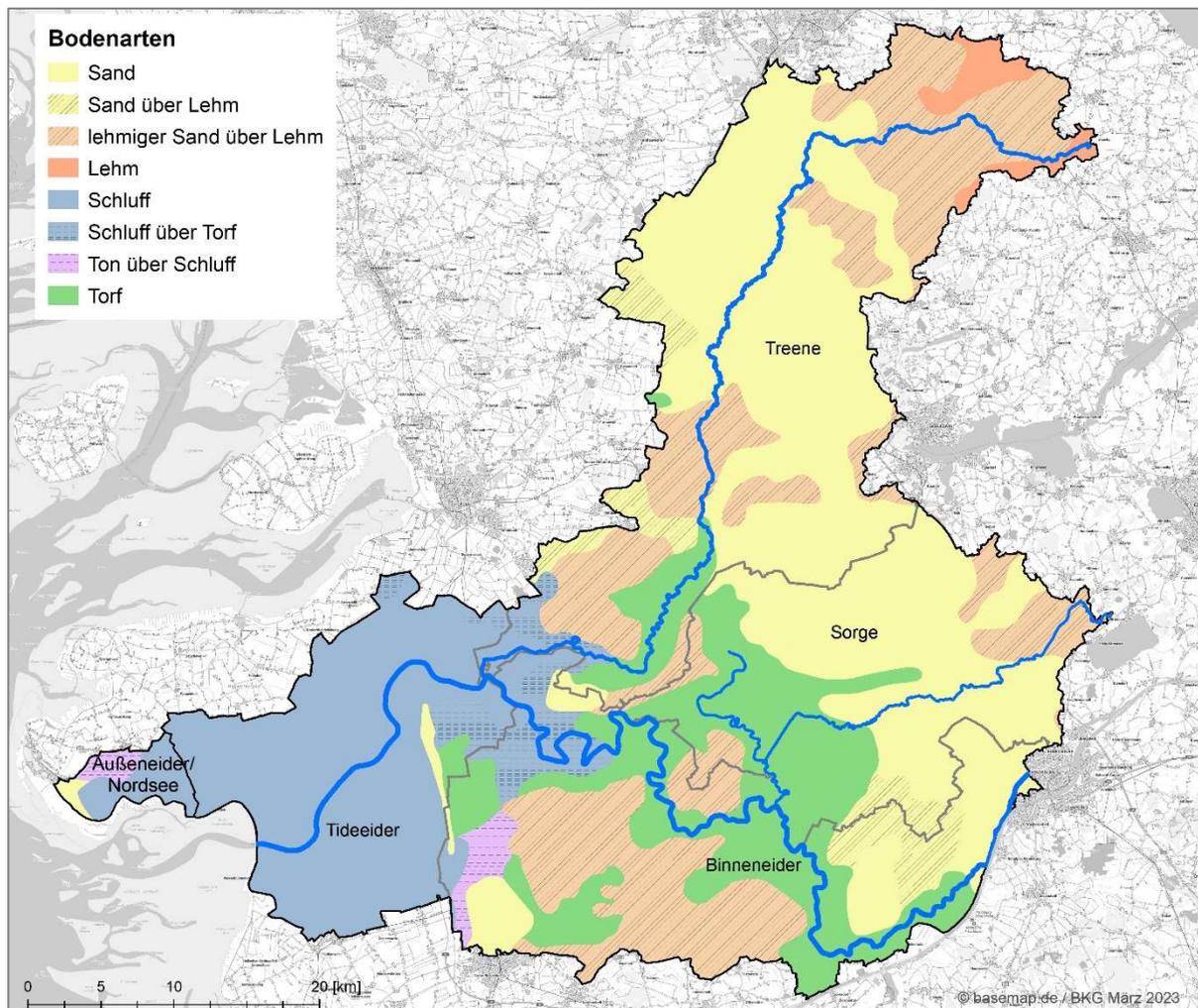


Abbildung 2-15: Vereinfachte Karte der Bodenartenschichtungen; Datengrundlage BÜK250, LfU

2.3 Bauwerke und technische Anlagen zur Wasserbewirtschaftung

Die Wasserstände in der Tideeider werden im Wesentlichen von folgenden Bauwerken gesteuert:

- dem Eider-Sperrwerk,
- der Schleuse und Wehranlage Nordfeld sowie
- der Entwässerungsschleuse und der Spülschleuse in Friedrichstadt.

Alle Angaben zu den Bauwerken wurden den Planunterlagen der Bestandsdokumentation entnommen. Zusätzlich wird in diesem Kapitel auf Deiche und Dämme eingegangen. Im Kapitel 2.3.5 „Zusammenwirken der baulichen Anlagen“ wird beschrieben, wie der Betrieb der Bauwerke in schwierigeren Entwässerungssituationen abgestimmt wird.

2.3.1 Eider-Sperrwerk

Das Eider-Sperrwerk wurde 1973 in Betrieb genommen. Mit den Seedeichen Eiderdamm-Nord (3,2 km) und Eiderdamm-Süd (1,2 km) trennt das Eider-Sperrwerk seitdem die Tideeider von der Außeneider ab. Zusätzlich zu dem Sperrwerk wurde der circa 6 km lange Leitdamm errichtet. Er verläuft vom Sperrwerk nördlich der Tideeider nach Osten bis zur Grünen Insel. Mit ihm wurde das 15 km² große Katinger Watt eingedeicht. Abbildung 2-16 zeigt ein Luftbild des Eider-Sperrwerkes.



Abbildung 2-16: Eider-Sperrwerk mit Blickrichtung stromauf, Foto © BAW 2019

Das Sperrwerk besteht aus einem Sielbauwerk, einer Schiffsschleuse und einer Straßenverbindung mit Tunnel. Das Sielbauwerk hat eine Gesamtlänge von 224 m. Die 5 Öffnungen haben eine lichte Weite von je 40 m. Sie werden durch vier 6 m breite Wehrträger getrennt. Zwei Segmentverschlussreihen, von der jeweils eine see- und binnenseitig angeordnet ist, bieten eine doppelte Sicherheit. Die Segmenttore verschließen durch Herabfahren die Durchflussöffnung. Die Sohle des Durchlasses liegt auf - 4,60 m NHN. Die Öffnungshöhe der Sieldurchlässe beträgt 6,5 m lichte Höhe². Die Unterkante (UK) der geöffneten Segmenttore liegt bei 1,90 m NHN. Die Länge der Sielöffnungen beträgt 64,80 m.

²Abstand in [m] von Unterkante Sohle bis Oberkante Öffnung

Üblicherweise werden alle betriebsbereiten Segmenttore der Binnenseite bzw. der Außenseite gemeinsam bewegt. Wie das Eider-Sperrwerk betrieben wird, ist festgelegt in der Betriebsordnung (Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord 1977). Es wird zwischen Betriebsfällen und Einsatzarten unterschieden.

- Normaler Betriebsfall:
 - o Bei Siel- und Sperrbetrieb wird nur einer der beiden Verschlüsse jeder Öffnung bewegt.
 - o Bei erhöhten Außenwasserständen wird das Sperrwerk so rechtzeitig geschlossen, dass der ausgespiegelte Binnenwasserstand NN + 1,80 m nicht überschreitet.
- Besonderer Betriebsfall: Wenn die Einsatzarten „Eingeschränkter Tidebetrieb“ oder „Spülbetrieb“, „Sielbetrieb“ oder „Sperrbetrieb“ gewählt werden.
- Außergewöhnlicher Betriebsfall. Dieser tritt bei folgenden Anlässen ein:
 - o Sturmflut (Wasserstand am Pegel Eider-Sperrwerk AP überschreitet das mittlere Tidehochwasser um mehr als 1 m)
 - o Sturmflutkatastrophe (Katastrophenalarm wurde ausgelöst)
 - o Gefahr einer Überschwemmungskatastrophe
 - o Eis
 - o Betriebsstörung
- Betrieb aus besonderem Anlass in folgenden Fällen:
 - o Zur Abwendung einer drohenden Gefahr für eine Person, das Bauwerk oder ein schwimmendes Fahrzeug bzw. Gerät,
 - o Für die laufende Überwachung der Betriebsanlagen des Sperrwerks oder zur Ergänzung der hydrologischen Unterlagen,
 - o Zur Regelung des Durchflusses durch das Siel oder durch die Schleuse,
 - o Bei besonderem Interesse für das Allgemeinwohl.

Es gibt folgende Einsatzarten:

- Uneingeschränkter Tidebetrieb: Die Tideströmung durch das Sperrwerk hindurch wird nicht beeinflusst.
- Eingeschränkter Tidebetrieb: Die ein- oder ausströmende Wassermenge wird gedrosselt.

- **Sielbetrieb:** Das Sperrwerk wird möglichst schon zum Zeitpunkt der Ebbekenterung geschlossen. Der Sielbetrieb kann sich über mehrere Tiden fortsetzen. Das Sperrwerk wird dann zwischenzeitlich nur zu Entwässerungszwecken geöffnet. Der Sielbetrieb gilt als beendet, sobald der Flutstrom wieder in die Tideeider eingelassen wird.
- **Spülbetrieb:** Das Sperrwerk wird während der Ebbe geschlossen und nach einer bestimmten Zeit derselben Ebbephase wieder geöffnet.
- **Sperrbetrieb:** Das Sperrwerk wird während der Flut, spätestens bei Erreichen eines Wasserstandes von NN + 1,8 m am Pegel Eider-Sperrwerk BP, geschlossen.

Weitere Informationen zu Betriebs- und Einsatzarten sowie statistische Auswertungen dazu sind in Siegmann et al. (2021a) enthalten.

2.3.2 Schleuse und Wehranlage Nordfeld

Das seit 1936 bestehende Bauwerk in Nordfeld sperrt die Binneneider vom Tideeinfluss ab. Ursprünglich zur Sturmflutsicherung gebaut, ist es seit dem Bau des Eider-Sperrwerkes in die 2. Deichlinie gerückt. Abbildung 2-17 zeigt ein Foto der Anlage.



Abbildung 2-17: Schleuse und Wehranlage Nordfeld, Foto © BAW 2019

Das Siel hat fünf rechteckförmige Öffnungen. Sie sind jeweils 6 m breit, 5 m hoch und 30,8 m lang. Die Oberkante der Sohle des Sieldurchlasses liegt auf - 4,50 m NHN. Die Öffnungen können mit Stemmtoren im Unterwasser (Tideeider) oder Segmenttortafeln

bzw. Hubtoren im Sielgebäude verschlossen werden. Die im Winter genutzten Stemmtore reduzieren die Durchflussbreite je Sielöffnung um ca. 25 % auf 4,50 bis 4,80 m.

Der Wasserausgleich in der Schiffsschleuse findet über den Wasserstandsunterschied mittels der Segmenttore statt. Die Schiffsschleuse hat zusätzlich zwei große Fluttore, da die Schleuse vor dem Bau des Eider-Sperrwerkes die 1. Deichlinie bildete. Der Betrieb der Sielanlage hat Vorrang vor dem der Schleuse. Die Schleusungen werden in einem Betriebs-tagebuch notiert. Bednarczyk (2003) beschreibt in einem Aktenvermerk den Betrieb des Siels Nordfeld. Die nachfolgende Darstellung basiert auf seinen Ausführungen und wurde mit Hilfe des Betriebsstellenleiters Herrn Dahl ergänzt. Grundsätzlich wird zwischen Sommer- und Winterbetrieb unterschieden. Im Sommerbetrieb wird mit 5 Hubtoren gearbeitet, die Stemmtore sind arretiert. Die Hubtore werden manuell bedient. Daher ist die Anlage 24 Stunden besetzt. Es werden folgende Betriebsarten unterschieden:

- Sielbetrieb
- Entwässerung
- Bewässerung
- Sperrbetrieb
- Spülbetrieb (Sommerbetrieb, Spülperiode Ende März und Anfang November)

Es wird zwischen Auslass und Einlass unterschieden. Von Auslass wird gesprochen, wenn so gesteuert wird, dass Wasser von der Binneneider in die Tideeider fließen kann. Bei Einlass fließt Wasser aus der Tideeider in die Binneneider.

Folgende Wasserstände sollen mit dem Betrieb der Anlage Nordfeld in der Unteren Binneneider eingehalten werden:

Maximaler Wasserstand: 5,30 m PN (0,30 m NHN)

Regel-Wasserstand: 4,80 bis 4,30 m PN (- 0,20 bis - 0,70 m NHN)

Minimaler Wasserstand: 4,00 m PN (- 1,00 m NHN)

Die Betriebsarten sind abhängig vom Wasserstand der Tideeider, der wiederum vom Eider-Sperrwerk bestimmt wird. Ein Informationsaustausch vom Eider-Sperrwerk zur Anlage Nordfeld erfolgt mittels Fax und Telefon. Welcher Betrieb gefahren wird, ergibt sich aus den Eintragungen im Wasserbuch (Datum, Uhrzeit, Öffnungshöhe der Tore).

2.3.3 Schifffahrts- und Entwässerungsschleuse sowie Spülschleuse Friedrichstadt

In Friedrichstadt gibt es zum einen die Schifffahrts- und Entwässerungsschleuse Friedrichstadt, zum anderen die Spülschleuse. Über diese beiden Siele entwässert die Treene

bei Niedrigwasser in die Tideeider. Das nachfolgende Foto zeigt eine Luftbildaufnahme der beiden Anlagen (Abbildung 2-18).



Abbildung 2-18: Schifffahrts- und Entwässerungsschleuse (rechts mittig) und Spülschleuse (links unten) in Friedrichstadt, Foto © BAW 2019

Der maßgebliche Oberwasserzufluss erfolgt über die Schifffahrts- und Entwässerungsschleuse. Der Oberwasserzufluss über die Spülschleuse ist sehr gering. Zum Schutz der Altstadt und ihrer Grachten vor Binnenhochwasser aus der Treene gibt es drei Stemmtore: Abgang des Ostersielzugs aus dem Speicherbecken der Treene, Abgang des Mittelburggrabens aus dem Westersielzug und Abgang des Fürstenburggrabens aus dem Westersielzug. Der Eider-Treene-Verband ist Eigentümer der Hochwasserschutzanlagen. Die Entwässerung der Siele und Grachten erfolgt über die Spülschleuse.

Die Entwässerungsschleuse hat drei Sielöffnungen mit Stemmtoren in Richtung Tideeider. Die Sielöffnungen sind 7,50 m breit, 4,70 m hoch und circa 20 m lang. Die Oberkante Sohle liegt bei - 4,00 m NHN. Die Spülschleuse hat eine Sielöffnung mit einem Stemmtor in Richtung Tideeider. Die Sielöffnung ist 7,50 m lang, 4,40 m breit und circa 30 m lang. Die Oberkante Sohle liegt bei - 3,40 m NHN.

Der Betrieb der beiden Schleusen ist in der „Dienstanweisung für den Betrieb und die Unterhaltung der Schifffahrts-, Entwässerungs- und Spülschleuse Friedrichstadt“ (Landesbe-

trieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein 2017) beschrieben. Die Anlagen sollen so betrieben werden, dass nachfolgende Wasserstände eingehalten werden:

Mindestwasserstand:	4,14 m PN (- 0,86 m NHN)
Regelwasserstand:	4,20 bis 4,40 m PN (- 0,80 bis - 0,60 m NHN)
Höchstwasserstand:	5,00 m PN (0,00 m NHN)

Wie lange ein Sielzug dauert, hängt vom Tideverlauf ab. Das Eider-Sperrwerk informiert bei Bedarf den Leiter der Schleuse über seine Einsatzart. Die Anlage Nordfeld und die Schleusen Friedrichstadt stimmen sich täglich untereinander über Entwässerungsvorgänge ab. Die Entwässerungsschleuse kann zu Spülzwecken herangezogen werden. Die Stadt Friedrichstadt ist im Besitz eines Staurechtes an der Treene am Pegel Friedrichstadt Eidermühle:

Niedrigwasser NW: + 414 cm PN (- 0,86 m NHN)

Dieser Wasserstand darf nicht unterschritten werden, da andernfalls die Holzpfahlgründungen der alten Häuser trockenfallen und somit verwittern würden.

2.3.4 Deiche und Dämme

Im Untersuchungsbereich liegen zahlreiche Deiche und Dämme, zum einen die Seedeiche in Richtung Nordsee, nördlich und südlich des Eider-Sperrwerkes der Eiderdamm Nord und Süd, der Eiderdeich, der Leitdamm, die Treenedeiche und Sommerdeiche. Die Lage der Deiche und Dämme zeigt Abbildung 2-19.

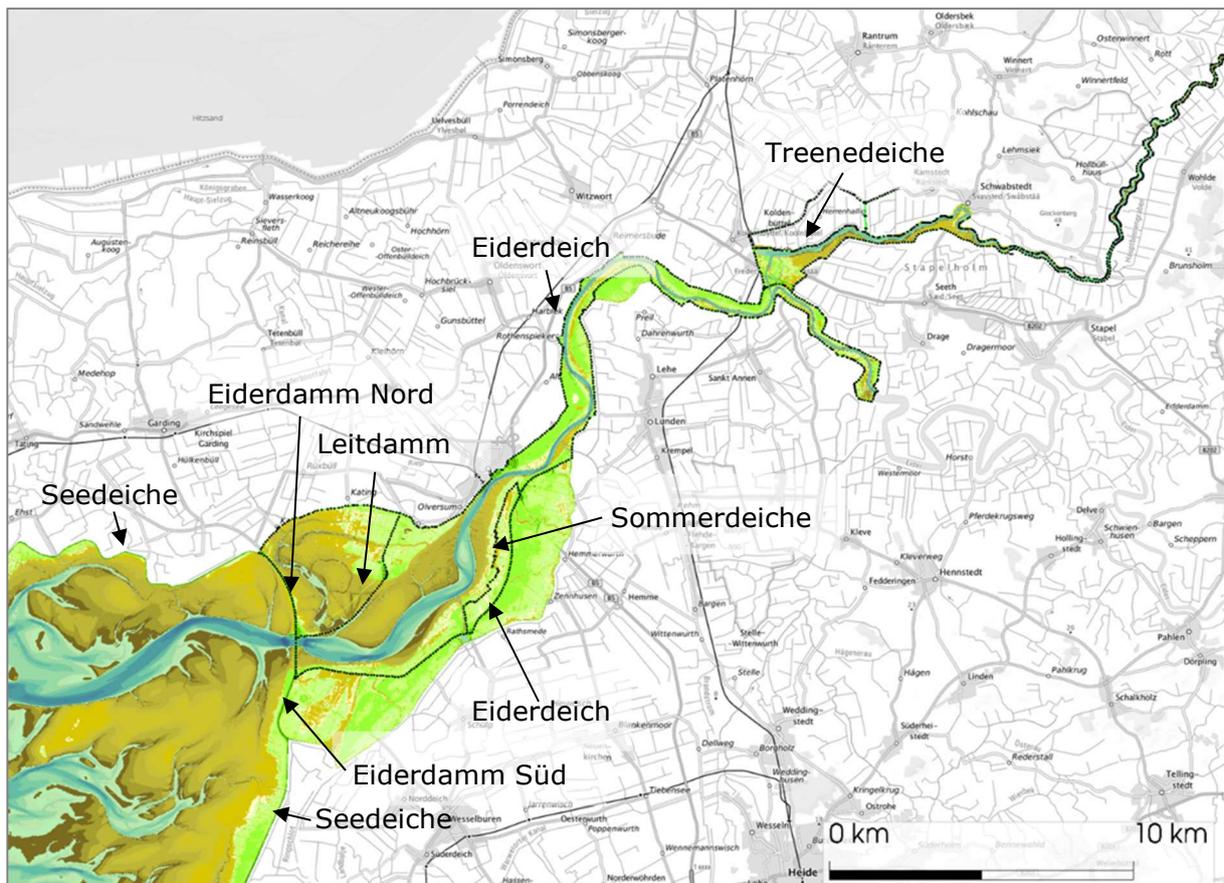


Abbildung 2-19: Deiche und Dämme im Untersuchungsgebiet, Hintergrundkarte DTK250 © GeoBasis-DE / BKG (2020)

Die Deiche und Dämme weisen folgende Deichoberkanten (DOK) auf:

Seedeiche	DOK zwischen 8 m und 8,8 m NHN
Eiderdamm Nord	DOK 8,7 m NHN
Eiderdamm Süd	DOK 9,2 m NHN
Eiderdeiche	DOK zwischen 6 m und 7,5 m NHN, überwiegend zwischen 6,5 m und 7 m NHN
Leitdamm	DOK zwischen 3 m und 3,3 m NHN
Sommerdeiche	DOK zwischen 2,3 m und 2,7 m NHN
Treenedeiche	DOK zwischen 1,2 m und 2 m NHN

2.3.5 Zusammenwirken der baulichen Anlagen

Bei gutem Wetter und mittleren Wasserständen verläuft das Zusammenspiel zwischen Eider-Sperrwerk und den Anlagen Nordfeld und Friedrichstadt wie in der nachfolgenden Abbildung 2-20 schematisch dargestellt. Auf Grundlage der vom BSH vorhergesagten Wasserstände, der auf <https://www.pegelonline.wsv.de> verfügbaren Wasserstände, der Wettervorhersage, betrieblicher Belange und Anforderungen durch die Schifffahrt erstellt die Gewässerkunde des WSA Elbe-Nordsee, Standort Tönning, einen Betriebsplan für das Eider-Sperrwerk. Die Anlagen Friedrichstadt und Nordfeld werden über den Betriebsplan informiert und stimmen sich untereinander über ihre Entwässerungsvorgänge ab.

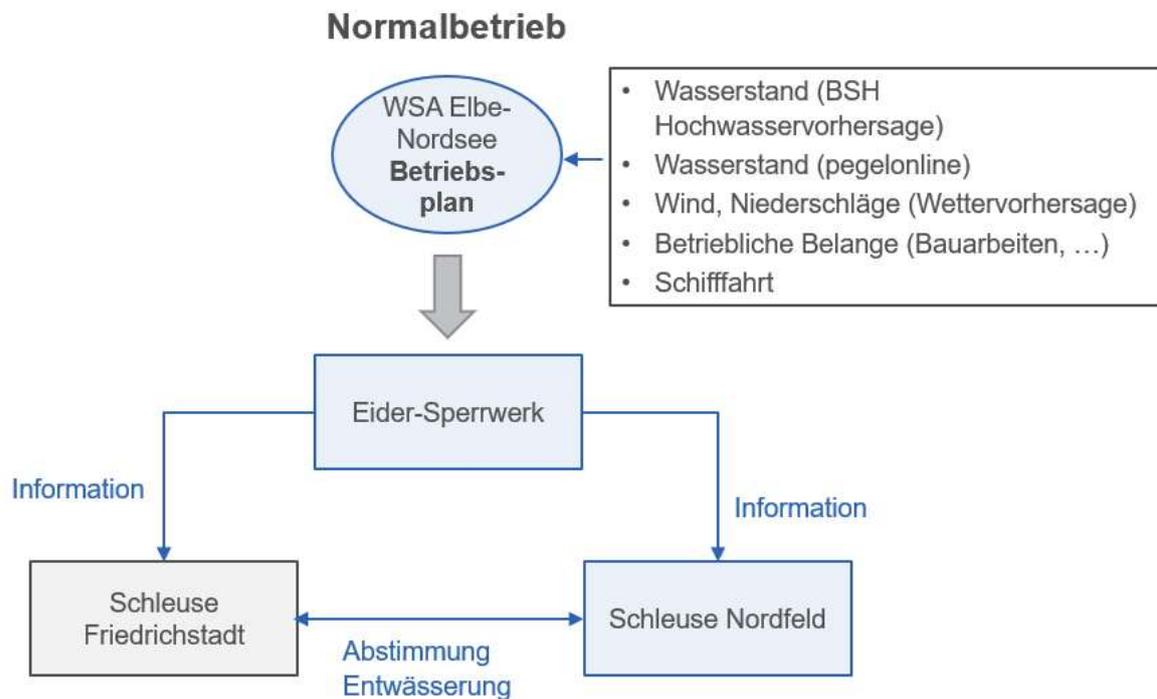


Abbildung 2-20: Zusammenwirken der wasserbaulichen Anlagen im Normalbetrieb

Der LKN.SH betreibt hierfür einen Eider- Wach- und Warndienst (EWW). Dieser beobachtet das Wetter, die Wasserstände und Abflüsse im gesamten Einzugsgebiet der Eider und steuert die Kommunikation zwischen Wasser- und Bodenverbänden, dem Land Schleswig-Holstein und dem WSA Elbe-Nordsee nach festgelegten Alarmstufen und Meldewegen. Dies ist detailliert beschrieben in (Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein 2019). In den letzten Jahren kam es immer wieder zu gefährlichen Hochwassersituationen im Bereich der unteren Treene. Zwei Konstellationen führten hauptsächlich zu diesen Hochwassersituationen:

- Zum einen kommt es zu Hochwasser durch Rückstau aufgrund hoher Wasserstände in der Tideeider. Diese können unterschiedliche Ursachen haben. Durch langanhaltende

Westwinde kann sich ein erhöhtes Tnw aufbauen. Dies ist sowohl bei Spring- als auch bei Nipptiden möglich. Bei Nipptiden liegen erhöhte Tnw vor. Oder es erhöht sich der Wasserstand in der Tideeider aufgrund sehr hoher Abflüsse aus der Binneneider und der Treene. Oft handelt es sich um eine Kombination von beidem.

- Zum anderen kann es durch langanhaltende ergiebige Niederschläge im Einzugsgebiet zu Hochwasser im Bereich der Binneneider und der Treene kommen. Das Treenehochwasser im Dezember 2014 ist ein Beispiel für ein Binnenhochwasser mit untergeordneter seeseitiger Bedingung. Das Gleiche gilt für das Binnenhochwasser im Februar 2022.

Der EWWD, wahrgenommen von der Haupttrufbereitschaft des LKN.SH, beobachtet die Situation im Einzugsgebiet. Das Überschreiten bestimmter Wasserstände und Abflusswerte gilt als Alarmwert. Bei angespannten Entwässerungsbedingungen nimmt die Haupttrufbereitschaft, nach vorheriger Absprache mit den Wasser- und Bodenverbänden, Kontakt zur Gewässerkunde des WSA Elbe-Nordsee auf. Es findet eine einvernehmliche Abstimmung über die Steuerung des Eider-Sperrwerkes statt. Die nachfolgende Abbildung 2-21 zeigt das Zusammenspiel der Ämter.

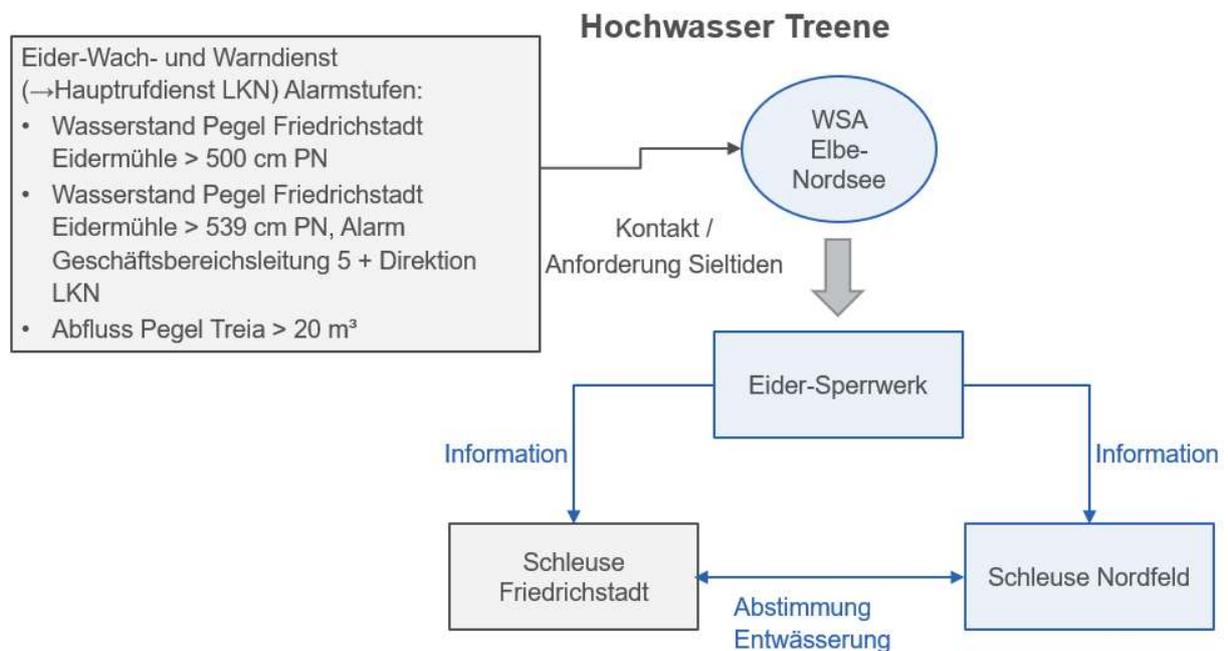


Abbildung 2-21: Zusammenwirken der wasserbaulichen Anlagen bei Hochwasser in der Treene

Auch im Sommer kann es ebenfalls erforderlich werden, dass sich die Betreiber der Anlagen abstimmen (Abbildung 2-22).

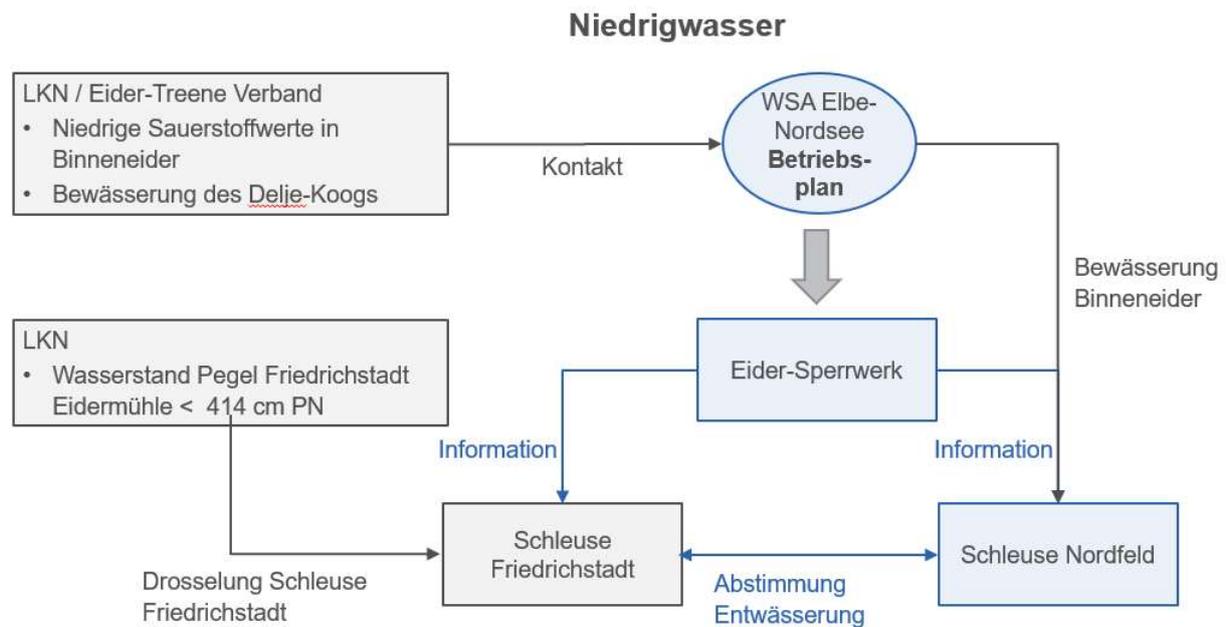


Abbildung 2-22: Zusammenwirken der wasserbaulichen Anlagen bei Niedrigwasser

Aus Sicht des WSA Elbe-Nordsee traten am Eider-Sperrwerk in den letzten Jahren folgende schwierigen Entwässerungssituationen auf:

- Orkan Christian (27. und 28.10.2013): Dieser hatte sehr hohe Windgeschwindigkeiten (170 km/h). Die Wasserstände im Außenbereich waren allerdings eher unkritisch. Dennoch musste über drei Tiden das Sperrwerk geschlossen bleiben, da die Tnw durch den starken Wind deutlich höher aufliefen.
- Orkan Xaver (5.12.2013): Die meisten Pegelstände lagen zwischen etwa drei und vier Metern über dem mittleren Hochwasser (MHW). Die Windgeschwindigkeiten lagen nur bei 140 km/h. Über vier Tiden hinweg waren die Wasserstände allerdings so hoch, dass die Sielöffnungen dauerhaft geschlossen bleiben mussten.
- Dezember 2014: In diesem Monat regnete es lange und anhaltend (≈ 260 mm/M). Fast alle Tiden konnten nicht in die Tideeider eingelassen werden. Die Deiche weichen trotzdem allmählich auf. Dann folgte Anfang Januar eine Serie aus Sturm – und Orkantiefs, sodass wieder etliche Fluten ausgesperrt werden mussten.

Das LKN.SH beschreibt folgende schwierige Entwässerungssituation:

- Anfang Januar 2012, während einer Nipptide und Windstau durch anhaltende Westwinde konnte während vier Tiden am Eider-Sperrwerk nicht gesielt werden. Zwar erreichte das Thw am Eider-Sperrwerk nur einmal die Marke + 3 m NHN, doch waren die Tnw stark erhöht (Tnw am 04.01.2012 02:23 Uhr: + 1,81 m NHN). Zur selben Zeit führten die Binnengewässer Hochwasser. In der Tideeider stieg der Wasserspiegel (Nordfeld Unterwasser 05.01.2012 19:17 Uhr: 0,88 m NHN). Die Treene

und die Binneneider konnten nicht mehr in die Tideeider entwässern. Besonders im Bereich der unteren Treene bauten sich hohe Wasserstände auf (Friedrichstadt Eidermühle 06.01.2012 04:20 Uhr: 0,89 m NHN).

Problematisch ist folglich:

Langanhaltende (mehrere Tage) Westwinde mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten. Diese können das Tnw soweit erhöhen, dass die Siele nicht geöffnet werden können. Erschwert wird die Situation, wenn im Binnenland langanhaltende Niederschläge eine Entwässerung erforderlich machen.

Langanhaltende Niederschläge können aber auch ohne seeseitigen Einfluss zu extremen Binnenhochwasser führen (Beispiel Dezember 2018, Februar 2022).

Weitere Informationen sind in (Siegmann et al. 2021a) zu finden.

2.4 Wasserwirtschaftliche Anlagen und Schöpfwerke

Verteilt im gesamten Gebiet findet sich eine hohe Anzahl an wasserwirtschaftlichen Anlagen. Abbildung 2-23 zeigt die Anlagen im Einzugsgebiet auf Basis der Angaben des Digitalen Anlagenverzeichnis Schleswig-Holstein (ohne Kontrollschächte und Messstellen). Den größten Anteil an wasserwirtschaftlichen Anlagen bilden Rohrdurchlässe (Anzahl ca. 5900) und Überfahrten (Anzahl ca. 7100). Relevant für die Modellierung sind einerseits die Schöpfwerke (Abbildung 2-24) und Wehre (Abbildung 2-25).

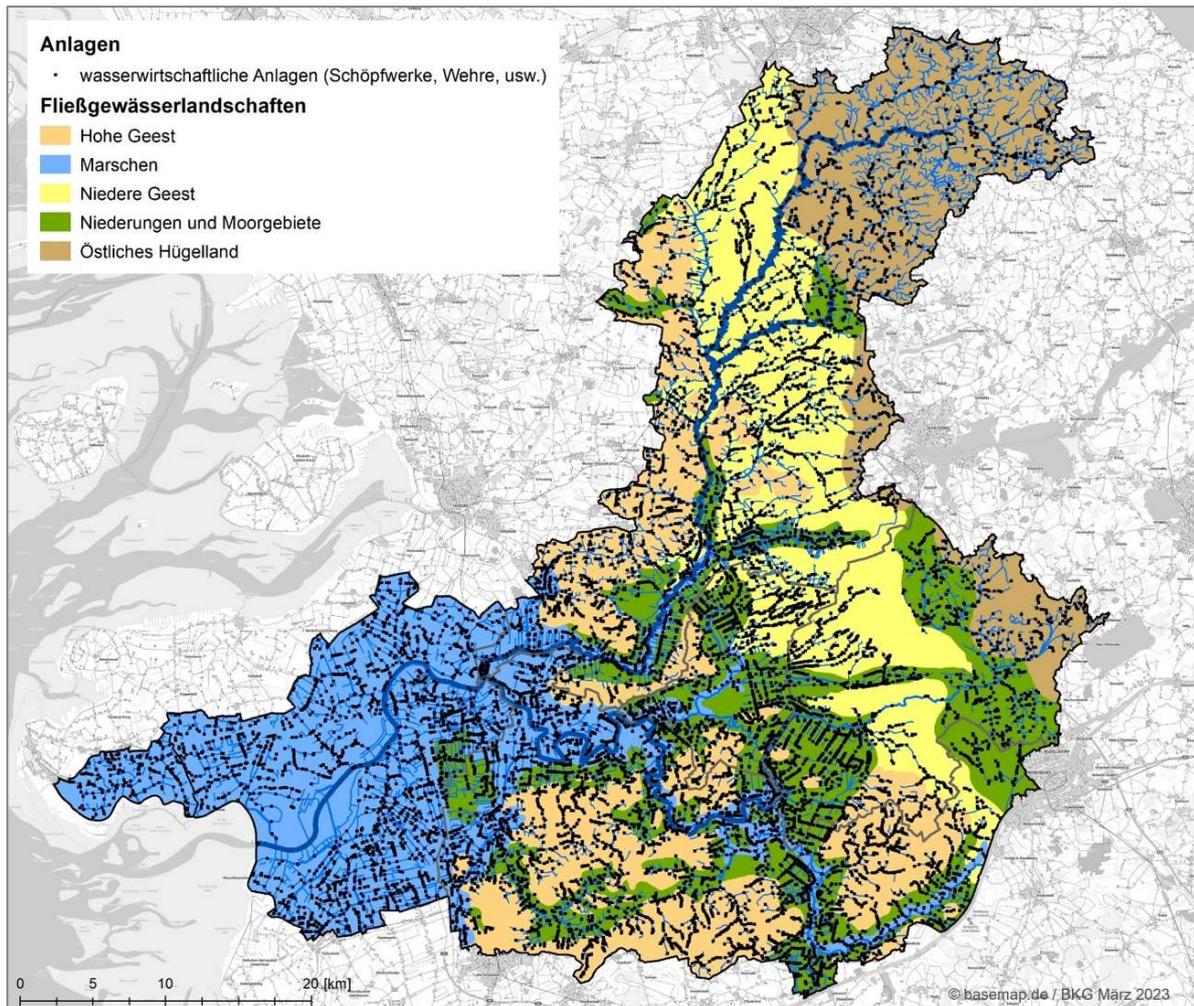


Abbildung 2-23: Wasserwirtschaftliche Anlagen im Untersuchungsgebiet (Datengrundlage: Digitales Anlagenverzeichnis Schleswig-Holstein, Wasser- und Bodenverbände des Landes Schleswig-Holstein und Land Schleswig-Holstein, Fließgewässerlandschaften LfU)

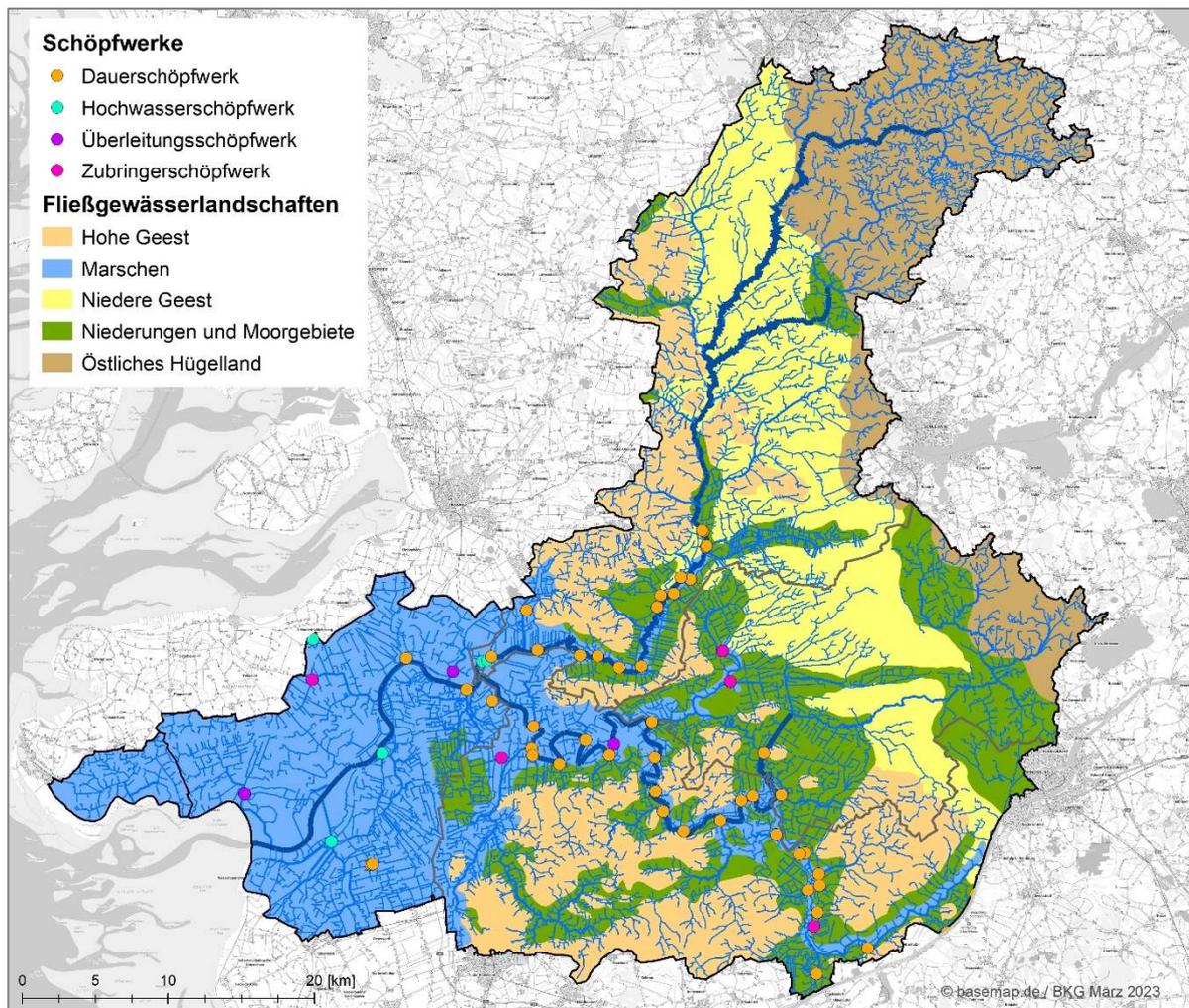


Abbildung 2-24: Schöpfwerke im Untersuchungsgebiet; Datengrundlage: DAV -WBV/Land SH, Fließgewässerlandschaften LfU

Im Einzugsgebiet liegen laut den verfügbaren Geodaten 60 Schöpfwerke vor. Hier-von sind 48 dem Eider-Treene-Verband, 6 dem DHSV Dithmarschen und 5 dem DHSV Eiderstedt zugeordnet.

Drei der Anlagen des DHSV Dithmarschen (St. Annen-Bösbüttel, Tödienwisch I und Tödi-enwisch II) sind Kleinstschöpfwerke, die zur Entwässerung kleiner, Vorfluter-ferner Niede-rungen dienen. Diese werden wegen ihres stark begrenzten Einflusses auf den Wasser-haushalt der Eider in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Von den verbliebenen 56 Schöpfwerken sind insgesamt 43 als Dauerschöpfwerke, 5 als Hochwasserschöpfwerke, 5 als Zubringerschöpfwerke und 3 als Überleitungsschöpfwerke klassifiziert.

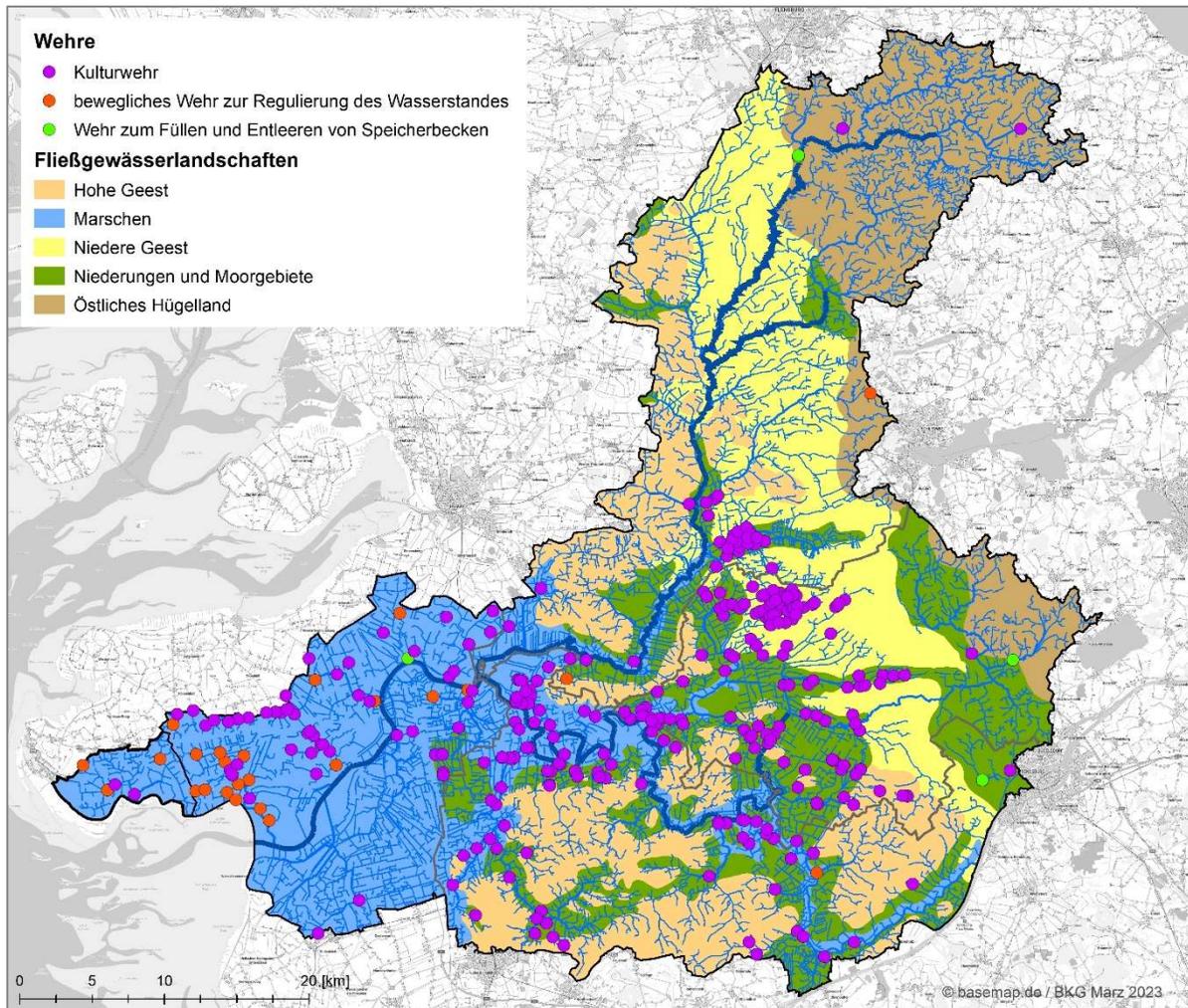


Abbildung 2-25: Wehre im Untersuchungsgebiet; Datengrundlage: DAV -WBV/Land SH, Fließgewässerlandschaften LfU

3. Datengrundlage

3.1 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Zu Beginn der Projektbearbeitung wurden alle der BAW zur Verfügung stehenden Mess- und Geobasisdaten, Bestandspläne sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen und Berichte gesichtet und ausgewertet. Es wurde bewertet, welche Daten die BAW für den Aufbau ihrer Modelle (3D-HN-Modell, Sedimenttransportmodell) benötigt und welche fehlen (Siegmann und Kösters 2020). Zum einen wurden die vorliegenden Daten ausgewertet und das Ergebnis in einem Bericht zusammengefasst (Siegmann et al. 2021a). Dies wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben (3.1.1 Beschreibung des Ist-Zustandes). Zum anderen wurden gemeinsam mit dem WSA Elbe-Nordsee die fehlenden Daten erhoben (3.1.2 Erhebung fehlender Datensätze).

3.1.1 Beschreibung des Ist-Zustandes - Grundlagenermittlung

Alle baulich relevanten Bauwerke, die Geologie und Morphologie sowie alle Parameter, welche in Hinblick auf Hydrodynamik und Sedimenttransport wichtig sind, wurden gesammelt, beschrieben und analysiert. Die Informationen wurden im Weiteren genutzt, um das 3D-HN-Modell der Außen- und Tideeider aufzubauen. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden.

- *Bauwerke*: Die Hydrodynamik des Systems wird durch das Eider-Sperrwerk maßgeblich bestimmt. Durch unterschiedliche Betriebs- und Einsatzarten steuert es den Austausch zwischen Außen- und Tideeider. Der Flutstrom wird fast immer gedrosselt. In den letzten Jahren wurde am Eider-Sperrwerk, aufgrund der vorliegenden Wetter- und Entwässerungsbedingungen, häufiger Sielbetrieb gefahren.
- *Geomorphologie*: Die morphologischen Veränderungen der Außen- und Tideeider in den letzten 20 Jahren wurden auf Grundlage vorliegender raum- und zeitinterpolierter digitaler Geländemodelle (DGM-I) untersucht. Die Geländemodelle wurden im Rahmen des BAW-Projektes „Erweiterung des Funktionalen Bodenmodells für die Ästuarbereiche“ (Milbradt und Sievers 2019) erzeugt. Die DGM-I's wurden für die Auswertungen genutzt. Sowohl in der Außeneider als auch in der Tideeider verlagern sich die Rinnen großräumig. Im Zeitraum 1996 bis 2017 lagerten sich sowohl in der Außeneider als auch in der Tideeider Sedimente ab. In der Tideeider sedimentierte vergleichsweise wenig Material (0,1 Mio. m³ pro Jahr). Allerdings kommt es in der Tideeider zu einer Umlagerung der Sedimente. Die Gewässerquerschnitte werden schmaler und kompakter. Die Ergebnisse der morphologischen Analysen wurden 2022 mit Hilfe der historischen Höhenmodelle des LKN.SH überprüft (Siegmann et al. 2023).

- *Sedimente:* Im IST-Zustandsbericht konnte lediglich auf Ergebnisse einer umfangreichen Probennahme von Ricklefs (1989) verwiesen werden. Deshalb wurde im August 2021 vom WSA Elbe-Nordsee und der BAW eine systematische Probennahme in der Außen- und Tideeider durchgeführt (Siegmann und Kösters 2021). Mittels einer Sieb- und Schlämmanalyse wurde die Korngrößenverteilung der Sedimentproben bestimmt sowie der Glühverlust ermittelt. In der Hauptrinne der Außeneider werden überwiegend enggestufte, sehr gleichförmige Mittelsande (0,5 bis 0,25 mm) und Feinsande (0,125 bis 0,25 mm) angetroffen. Der Feinanteil (< 0,063 mm) ist sehr gering. Auf den Wattflächen liegen ebenfalls sehr gleichförmige, enggestufte Feinsande und sehr feine Feinsande (0,063 bis 0,125 mm) vor. In der Tideeider werden zunächst Feinsande vorgefunden. Stromaufwärts von Schülpersiel bis Tönning werden sie von sehr feinen Feinsanden abgelöst. Ab Tönning wiederum verändert sich, in der schmaler werdenden Hauptrinne, das Verhältnis zugunsten der Feinsande. Erwartungsgemäß werden stromaufwärts ab Stromkilometer 96 westlich von Lunden die sehr feinen Feinsande wieder häufigste Fraktion. Kurz vor Friedrichstadt werden sie von den Schluffen als häufigste Fraktion abgelöst. In den Kolken der Außen- und Tideeider wird die sich auf einer Höhe von - 8 bis - 10 m NHN befindende, mehrere Meter mächtige Kleischicht angeschnitten. Im Umfeld der Kolke ist Kleigeröll anzutreffen.

Die Außeneider ist im hohen Maße, die Tideeider in etwas geringerem Umfang, morphologischen Umlagerungsprozessen unterworfen. Die lokale und temporäre Sedimentverteilung hängt von der aktuellen Morphologie und den sich daraus ergebenden veränderten Strömungsgeschwindigkeiten ab. Im Vergleich zu der Kartierung 1984 von Ricklefs (1989) sind die Mittelsande in der Kartierung 2021 in ihrer Häufigkeit in der Tideeider zurückgegangen. Im Bereich zwischen Tönning und Schülpersiel sind zudem statt Feinsande sehr feine Feinsande anzutreffen. Des Weiteren werden Mittelsande im zweiten Mäander der Südrinne westlich des Eider-Sperrwerkes angetroffen.

Die Ergebnisse liefern einen guten Überblick über die aktuelle Sedimentverteilung im Untersuchungsgebiet. Sie werden für die Oberflächenbelegung des Sedimenttransportmodells genutzt.

- *Hydrodynamik:*
 - *Wasserstände:* Die Tidedynamik der Außen- und Tideeider wird durch Wasserstandspegel erfasst. Für die Wasserstandsganglinien wurden Kennwerte der Jahre 2000 bis 2018 errechnet. Das mittlere Tidehochwasser steigt flussaufwärts, ebenso das mittlere Tideniedrigwasser. Der Tidehub sinkt von 3,0 m NHN am Eider-Sperrwerk-Außen, auf 2,7 m NHN in Tönning und 2,2 m NHN in Nordfeld. Die Eider zählt damit zu den mesotidalen Ästuaren. Im Längsprofil nimmt die Flutdauer flussaufwärts ab und die Ebbedauer zu. Die

Wasserstände in der Tideeider sind dabei durch die unterschiedlichen Betriebsfälle und Einsatzarten des Eider-Sperrwerks beeinflusst. Die Kennwerte des Wasserstandes spiegeln somit nicht nur die Tidedynamik wieder, sondern auch die Steuerung durch das Eider-Sperrwerk. Exemplarisch wurden die Kennwerte für einzelne Betriebsarten separiert und exemplarisch für das Jahr 2016 berechnet.

- **Strömung:** In der Eider gibt es kein Monitoring der Strömung. Die Strömung wurde in einzelnen Kampagnen an unterschiedlichen Orten erfasst. Für den Ist-Zustandsbericht wurden zwei ADCP-Messkampagnen ausgewertet: eine Messung der BAW im April 1996 circa 1 km vom Eider-Sperrwerk entfernt sowie eine Messung, **im Jahr 2018** durchgeführt in Zusammenarbeit von WSA Elbe-Nordsee und BfG, zwischen Tönning und Nordfeld. 2020 wurden die Messungen um eine Strömungsmessung im unmittelbaren Umfeld des Eider-Sperrwerkes ergänzt. Zum ersten Mal wurde auf zwei Querprofilen, vor und hinter dem Sperrwerk, gemessen. An vier Messtagen wurde über eine ganze Tide während vier Steuerungszuständen gemessen (Tidebetrieb, Flutdrosselung, Flut- und Ebbedrosselung sowie Flutdrosselung bei (n-1)-Betrieb). Die Messkampagne 09/2020 wurde in einem Messbericht (Siegmann et al. 2021b) beschrieben und ausgewertet. Zwar fielen bei der Messkampagne erwartungsgemäß die Messungen bei Drosselbetrieb auf der strömungsabgewandten Seite des Sperrwerkes aufgrund starker Turbulenzen für einen mehr oder weniger langen Zeitraum aus, dafür konnte auf dem zweiten Profil durchgängig gemessen werden. Es wurden maximale Fließgeschwindigkeiten (gemittelt über das Querprofil) zwischen 1,3 und 1,9 m/s gemessen. Bei Ebbe waren die Fließgeschwindigkeiten 0,2 m/s höher. Die errechneten maximalen Durchflüsse schwankten zwischen 1.700 m³/s und 2.100 m³/s. Aus den Strömungsgeschwindigkeiten lässt sich ein Tidevolumen von 53 bis 64 Mio. m³ für die gemessenen Tiden berechnen. Durch den Drosselbetrieb verkürzt sich die Flutdauer um 15 bis 30 min. Die ADCP-Querprofilmessungen wurden genutzt, um das hydrodynamische numerische Modell der Tide- und Außeneider zu validieren (Siegmann et al. 2022).

Über Drucksonden wurde der **Wasserstand** in unmittelbarer Nähe der Schütze gemessen. Bei maximalem Flut- und Ebbestrom bildete sich ein Wasserspiegelgefälle von 0,1 bis 0,2 m zu den Dauermessstellen hin aus. Die auf der Nord- und Südseite gemessenen Wasserstände differieren nicht. Bei Flutdrosselung bildete sich eine Differenz von 0,6 m zwischen Außen- und Binnenmesspegel aus, bei Flutdrosselung und (n-1)-Betrieb sogar um 0,8 bis 0,9 m. Wenn sich die Schütze bewegen, macht sich dies in einer kurzfristigen Auslenkung des Wasserspiegels um bis zu 10 cm bemerkbar.

- **Oberwasser:** Für den Oberwasserzufluss wurden die gewässerkundlichen Hauptwerte der Durchflussmesspegel gesichtet sowie die Stundenwerte der gemessenen Durchflüsse ausgewertet. Der ermittelte Oberwasserabfluss der Tideeider variiert zwischen 8 m³/s und 244 m³/s; das langjährige Mittel ist mit 32 m³/s im Vergleich zu den anderen deutschen Ästuaren sehr gering. Alle Nebenflüsse der Tideeider inklusive der Binneneider und der Treene sind über Siele oder Schöpfwerke an die Tideeider angeschlossen. Im Sommer wird über die Schleuse Nordfeld die Binneneider bewässert. Für jede Einleitungsstelle wurde in Zusammenarbeit mit den Deich- und Hauptsielverbänden die Größe des Einzugsgebietes ermittelt. Darüber hinaus wurde für jede Einleitungsstelle konkret die Entwässerungssituation beschrieben (Siegmann et al. 2021a). Bei Hochwasser wird die Tideeider als Rückhalteraum genutzt. Der Oberwasserabfluss ist im Vergleich zum Flutstromvolumen gering. Bei mittleren Verhältnissen wird das Abflussregime von der einlaufenden Tidewelle beherrscht.
- **Salzgehalte:** Die Eider ist als Ästuar den Einflüssen von salzigem Nordseewasser und süßem Oberwasser ausgesetzt. Im Bereich der Brackwasserzone schwanken die Salzgehalte mit der Tide. Die Besonderheit an der Eider ist wiederum die Steuerung am Eider-Sperrwerk, die sich auf die Ganglinie des Salzgehaltes auswirkt. Daneben sind die saisonalen Änderungen des Oberwasserzuflusses prägend. So ist im Winter der Oberwasserabfluss größer und folglich die Salzgehalte geringer. Zur Messung des Salzgehaltes steht lediglich seit Mitte 2017 eine Messstation in Tönning zur Verfügung. Die Messstation in Tönning liefert allerdings nicht durchgehend plausible Werte. Die Messwerte sind nur bedingt belastbar.
- **Ebenso wie die Salzgehalte werden auch die Wassertemperaturen im Wesentlichen von der einlaufenden Tidewelle und dem Oberwasserzufluss bestimmt.** Der direkte Atmosphärenaustausch spielt nur eine geringere Rolle. In den Wintermonaten herrschen Temperaturen zwischen 0 °C und 10 °C, in den Sommermonaten steigt die Temperatur auf 15 °C bis 25 °C. Stromaufwärts sind die Temperaturen geringfügig höher.
- **Wasserwirtschaftliche Aspekte:** Folgende extreme Entwässerungssituationen wurden benannt:
 - **Eider-Sperrwerk:** Langanhaltende Westwinde mit hohen Tidehoch- und Tideniedrigwassern treten in Kombination mit einem Binnenhochwasser auf. Das Binnenhochwasser macht eine Entwässerung erforderlich, was aber aufgrund hoher Wasserstände außerhalb nicht möglich ist.

- Untere Treene: Bei Hochwasser in der Treene und gleichzeitig hohen Wasserständen in der Tideeider kann keine Entwässerung in die Tideeider erfolgen.

3.1.2 Erhebung fehlender Datensätze

Folgende Daten fehlten zu Projektbeginn und wurden gemeinsam mit dem WSA Elbe-Nordsee erhoben.

- Zeitreihen zur Steuerung des Eider-Sperrwerkes
- Strömungsmessungen im Nahfeld des Eider-Sperrwerks
- Trübungs- und Leitfähigkeitsmessungen entlang des Längsprofils der Eider, um daraus Schwebstoffkonzentrationen und Salzgehalte zu errechnen.
- aktuelle Sedimentbelegung des Eider-Ästuars

Die Sperrwerkssteuerung wurde auf Grundlage von Drosselprotokollen und Betriebsprotokollen manuell erfasst. Um die weiteren Datenlücken zu schließen, führte die BAW gemeinsam mit dem WSA Elbe-Nordsee folgende Messkampagnen durch:

- Messkampagne 09/2020 zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse im Nahfeld des Eider-Sperrwerks sowie Messung der Trübung, Leitfähigkeit, Wassertemperatur und Strömungsgeschwindigkeit auf Verankerungen entlang des Längsprofils der Eider,
 - Daten: <https://doi.org/10.48437/02.2022.K.0601.0001>
 - Bericht: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110437>
- Messkampagne 06/2021 Sedimentprobennahme in der Außen- und Tideeider
 - Daten: <https://doi.org/10.48437/02.2022.K.0601.0002>
 - Bericht: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110436>
- Messkampagne 01/2022, Schwebstoffe, zur Kalibrierung
 - Daten und Bericht: <https://doi.org/10.48437/02.2023.K.0601.0001>

Zudem werden Trübungs- sowie weitere Wasserqualitätsmessdaten, die die Verhältnisse aller Jahreszeiten erfassen, für die Modellvalidierung und für die Einschätzung der Modellergebnisse benötigt. Deswegen führt das WSA Elbe-Nordsee eine einjährige Messkampagne durch. Der Messzeitraum geht über das Kalenderjahr 2023. Im Jahr 2022 wurden hierfür an vier Standorten der Außen- und Tideeider (Eider-Sperrwerk AP und BP, Tönning und Nordfeld UW) Multiparametermesssonden installiert, um die Parameter Trübung, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und Wassertemperatur in 2023 messen zu können.

3.2 Messtellen im Gewässernetz

Abbildung 3-1 zeigt die Lage der Wasserstands- und Durchflusspegel der WSV und des LKN.SH im Untersuchungsgebiet. Die Stundenwerte der Pegel liegen mehrheitlich seit 1998 bis Ende 2017, Anfang 2018 für die Projektbearbeitung vor. Die aktuelle Verfügbarkeit der Daten reicht bis zum Ende des hydrologischen Jahres 2022.

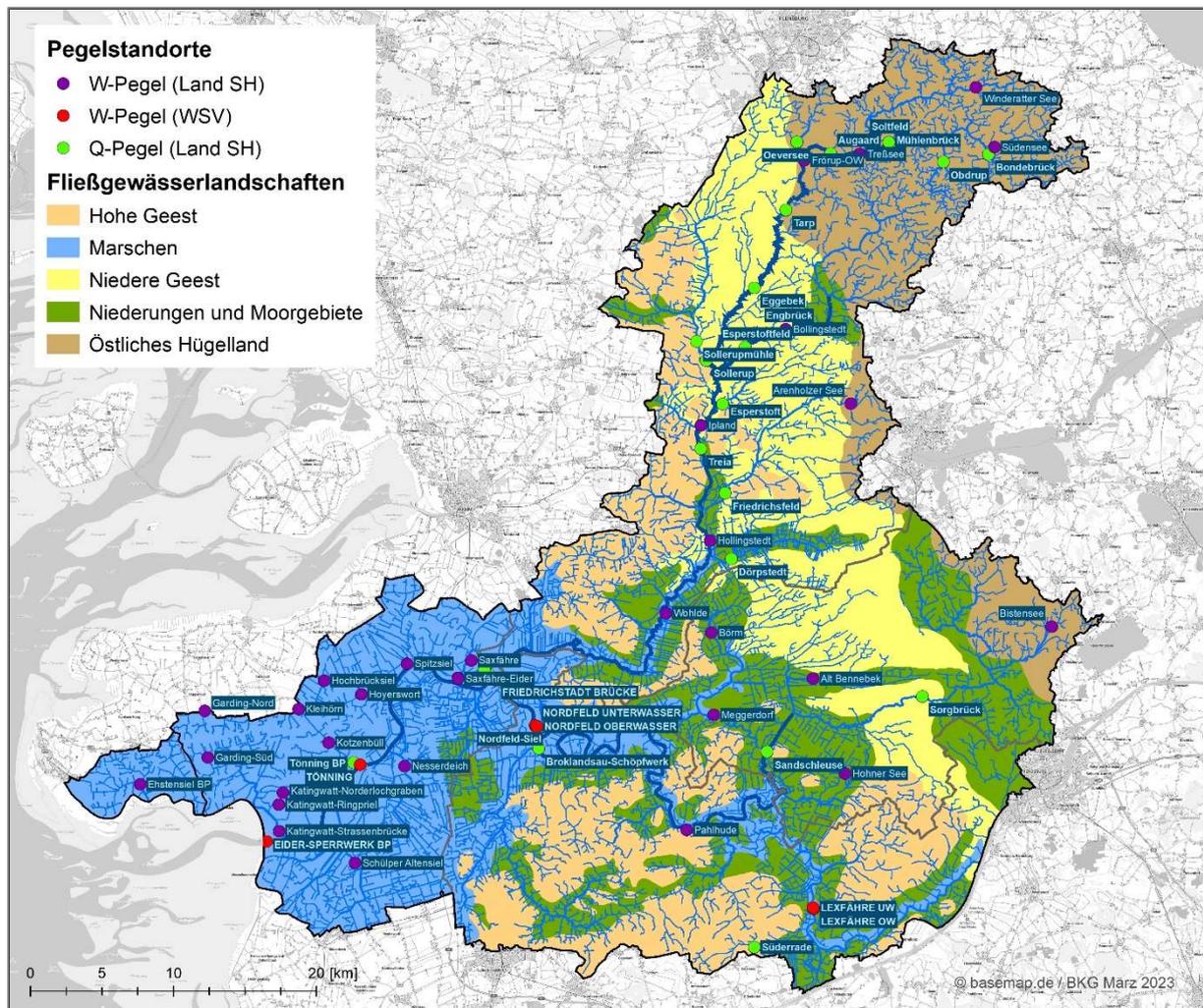


Abbildung 3-1: Wasserstands- und Abflusspegel im Oberflächenwasser vor dem Hintergrund der Fließgewässerlandschaften; Datengrundlage: Pegel WSV/Land SH, Fließgewässerlandschaften LfU

3.2.1 Messtellen der WSV

Aktuell betreibt die WSV acht Wasserstandspegel an der Eider, s. Tabelle 3-1. Die Daten werden per Datenfernübertragung in die Datenbank der WSV eingeführt und digital gespeichert.

Tabelle 3-1: Liste der Wasserstandspegel, Betreiber: WSV

	Pegel	Gewässer	Fläche des oberirdischen Einzugsgebietes Quelle: BfG-Datenbank (km ²)	Pegel-Nullpunkt Gültig ab 01.11.2019 (m NHN)	Beobachtungsbeginn Digitale Erfassung	Zeitliche Auflösung (min)
1	Lexfähre OW	Eider	116	-5.00	15.01.2000	1
2	Lexfähre UW	Eider	116	-5.00	01.10.1999	1
3	Nordfeld OW	Eider	970	-5.01	01.11.1999	1
4	Nordfeld UW	Eider	970	-5.01	02.10.1999	1
5	Friedrichstadt Straßenbrücke	Eider	1733	-5.02	25.09.1999	1
6	Tönning	Eider	1907	-5.06	19.10.1999	1
7	Eider-Sperrwerk BP	Eider	1200	-5.02	01.10.1999	1
8	Eider-Sperrwerk AP	Nordsee, Außen-Eider	2066	-5.02	30.09.1999	1

Die analogen Beobachtungen begannen in deutlich früheren Jahren, s. Tabelle 3-2.

Tabelle 3-2: Analoge Erfassung der Wasserstandspegel an der Eider, Betreiber: WSV

	Pegel	Beobachtungsbeginn		Zeitliche Auflösung	
		Lattenablesung	Schreibpegel	Lattenablesung	Schreibpegel
1	Lexfähre OW	01.12.1937 – 30.06.1938 (in der Zwischenzeit sind Beobachtungsbücher vorhanden aber keine Wasserstandslisten) 01.11.1985	01.11.1991	Tägliche Able- sung um 11:30 Uhr MEZ	Minuten- werte

	Pegel	Beobachtungsbeginn		Zeitliche Auflösung	
2	Lexfähre UW	01.12.1937	13.09.1927 - 09.11.1928, ab 20.03.1956	Täglich 11:30 Uhr MEZ	Minuten- werte
3	Nordfeld OW	01.11.1938	06.11.1937	Täglich 06:00 und 18:00 Uhr MEZ Ab Abflussjahr 1958 viermal täglich	Minuten- werte
4	Nordfeld UW	01.11.1938	16.10.1928	Thw / Tnw Ab- lesung	Minuten- werte
5	Fried- richstadt Straßenbrü- cke	01.02.1856 (alter Standort Eiderhafen) 01.11.1938 (Straßenbrücke)	15.08.1925 (alter Standort Eiderhafen) 05.07.1938 (Straßenbrü- cke)	Täglicher Hoch- wasserstand	Minuten- werte
6	Tönning	03.04.1867	28.08.1875	Täglicher Hoch- wasserstand	Minuten- werte
7	Eider-Sperr- werk BP	01.07.1973	11.06.1973	Thw / Tnw Ab- lesung	Minuten- werte
8	Eider-Sperr- werk AP	01.09.1972	27.04.1972	Thw / Tnw Ab- lesung	Minuten- werte
9	Rendsburg	1853 - 1948	1910 - 1948	Täglich 1 bis 2 Ablösungen	Minuten- werte
10	Hundeknöll (Vorgänger Eider-Sperr- werk)	15.05.1953 – 31.08.1973	15.05.1953 – 06.11.1972	Thw / Tnw Ab- lesung	Minuten- werte

3.2.2 Messstellen des LKN.SH

3.2.2.1 Regulärer gewässerkundlicher Mess- und Beobachtungsbetrieb

Im Rahmen des regulären Messbetriebs zur gewässerkundlichen Überwachung wurden durch den LKN.SH 2020 5 Durchflussmessanlagen, 15 Abflussmessstellen, bei denen der Abfluss mittels Schlüsselkurve berechnet wird, und 26 Wasserstandspegel betrieben

(vgl. Tabelle 3-3 bis Tabelle 3-5). Während des Projektes „Zukunft Eider“ wurde durch den LKN.SH im Jahr 2020 zusätzlich eine Durchflussmessanlage an der Sandschleuse und eine am Schöpfwerk Broklandsau errichtet. Die Kalibrierung steht noch aus (Stand: März 2020). Der Pegel Kotzenbüll wurde im Juli 2020 zusätzlich mit Radar ausgerüstet, da die dort eingebaute Drucksonde die niedrigsten Wasserstände nicht messen konnte (LKN.SH, 2020).

Tabelle 3-3: Liste der 7 Durchflussmessanlagen, Betreiber LKN.SH

	Pegel	Ge- wäs- ser	Fläche des oberirdi- schen Ein- zugsge- bietes (km ²)	Pegel- Null- punkt (m NHN)	Beobach- tungsbeginn	Zeitli- che Auflö- sung
1	Friedrichstadt-Ei- dermühle**	Treene	794	5,01	Q: 01.01.1999 W: 01.11.1965	5 min
2	Friedrichstadt- Spülschleuse**	Oster- sielzug		-5,01	01.01.2000	5 min
3	Nordfeld-Siel*	Eider	945	-5,00	04.04.2003	5 min
4	Sandschleuse*	Sorge	265	-5,02	16.06.2020	5 min
5	Schöpfwerk Brok- landsau*	Brok- lands- au	138	-5,00	29.10.2019	5 min
6	Tönning**	Norder boot- fahrt	37,4	-5,02	20.12.2003	5 min
7	Treia**	Treene	481	-5,00	01.11.1945	15 bzw. 60 min

* Eingerichtet im Projekt „Zukunft Eider“; ** Regulären Messbetrieb

Tabelle 3-4: Liste der 15 Abflussmessstellen, Betreiber LKN.SH

	Pegel	Ge- wäs- ser	Fläche des oberirdi- schen Ein- zugsge- bietes (km ²)	Pegel- Null- punkt (m NHN)	Beobach- tungsbeginn	Zeitli- che Auf- lösung
1	Augaard	Treene	135	20,00	Q: 01.07.1998 W: 30.06.1998	60 min
2	Bondebrück	Bon- denau	20,3	20,00	07.12.2001	60 min
3	Dörpstedt	Rheider Au	57,7	-5,00	01.12.1995	60 min
4	Eggebek	Treene	196	5,00		60 min
5	Engbrück	Bolling stedter Au	83,1	5,01	29.03.2008	60 min
6	Esperstoft	Jübek	29,95	0,00	01.11.1974	60 min
7	Esperstoftfeld	Bolling stedter Au	98,9	0,00	Q: 01.11.1979 W: 01.11.1974	60 min
8	Friedrichsfeld	Sil- bersted- ter Au	66,9	-5,00	Q: 01.07.1995 W: 01.11.1994	60 min
9	Mühlenbrück	Bon- denau	75,7	20,15	Q: 01.11.1959 W: 01.07.1959	60 min
10	Obdrup	Müh- len- strom (Bon- denau)	14,14	23,00	07.12.2001	60 min
11	Oeversee	Bek	18,71	23,70	01.11.1979	60 min
12	Sollerupmühle	Jerris- bek	84,3	0,00	01.11.1974	60 min
13	Soltfeld	Kiel- stau	48	26,57	01.12.1985	60 min
14	Sorgbrück	Sorge	131	-5,02	Q: 01.01.1963 W: 01.08.1962	60 min
15	Süderade	Sü- derau	9,35	-5,02	01.11.1984	60 min

Tabelle 3-5: Liste der 30 Wasserstandspegel (davon 4 stillgelegt), Betreiber LKN.SH

	Pegel	Ge- wäs- ser	Fläche des oberirdi- schen Ein- zugsge- bietes (km ²)	Pegel- Null- punkt (m NHN)	Beobach- tungsbeginn	Zeitli- che Auf- lösung
1	Alt Bennebek	Benne- bek	30,2	-5,01	20.10.1997	5 min
2	Bistensee	Bisten- see	22,9	0,00	01.11.1969	60 min
3	Bollingstedt	Bolling- stedter Au	89,1	6,39	27.10.2014	60 min
4	Börm	Ring- schlote	20,1	-5,00	25.06.2019	5 min
5	Frörup OW	Treene	159	20,00	07.12.2001	60 min
6	Frörup UW	Treene	160	20,00	07.12.2001 (stillgelegt 09.01.2012)	60 min
7	Garding-Nord	Norder boot- fahrt	4,49	-5,03	01.11.1990	5 min
8	Garding-Süd	Süder- boot- fahrt	3,38	-5,02	04.11.1997	5 min
9	Hohner See	Hohner See	15,12	-1,80	01.04.1981	60 min
10	Hollingstedt	Treene	597	-5,02	01.10.1965	5 min
11	Hoyerswort	Alte Ei- der	18,8	-5,03	06.11.1970	5 min
12	Ipland	Treene	464	-4,99	17.10.2008	15 min
13	Katingwatt- Norderlochgra- ben	Norderl och- graben	41,1	-5,02	04.11.1997	5 min
14	Katingwatt-Ring- riel	Ring- riel		-5,02	04.11.1997	5 min
15	Katingwatt- Strassenbrücke	Staub- ecken Kating- watt	50,4	-5,02	01.07.2003	5 min
16	Kleihörn	Norder boot- fahrt	12,6	-5,02	01.11.2000	5 min

	Pegel	Ge- wäs- ser	Fläche des oberirdi- schen Ein- zugsge- bietes (km ²)	Pegel- Null- punkt (m NHN)	Beobach- tungsbeginn	Zeitli- che Auf- lösung
17	Kotzenbüll	Norder boot- fahrt	17,9	-5,03	04.11.1980	5 min
18	Meggerdorf	Alte Sorge	17,04	-5,01	04.03.2002	5 min
19	Nesserdeich	Haupt- au	24,3	-5,02	12.10.1997	5 min
20	Pahlhude	Eider	571	-5,02	01.10.1965	5 min
21	Schülper Alten- siel	Schül- per Sielzug	15,4	-5,02	05.03.2002	5 min
22	Sollerup	Treene	314	0,00	Q: 18.08.1998 bis 14.12.2011 W: 24.06.1998	60 min
23	Spitzsiel	Spitz- sieler Sielzug	8,1	-5,02	04.11.1997	5 min
24	Südensee	Süden- see	13,7	29,04	01.11.1984	60 min
25	Süderhöft	Treene		-5,01	01.01.1999 (stillgelegt 01.02.2012)	5 min
26	Tarp	Treene	178	9,00	16.04.2004 (bis 09.01.2012 auch Q)	60 min
27	Treia-Goosholz	Treene	485	-5,00	19.07.2017 (stillgelegt 16.08.2017)	15 min
28	Treia-Nord	Treene	478	-5,00	17.10.2008 (stillgelegt 01.02.2017)	15 min
29	Winderatter See	Winde- ratter See	11,2	34,82	26.11.1997	1-2 Wo- chen
30	Wohlde	Treene	697	-5,01	01.10.1965	5 min

3.2.2.2 Sondermessprogramm: Eider-Zuläufe

Das Sondermessprogramm dient zur Verbesserung der hydrologischen Kenntnisse im Eider-Gebiet (s. Tabelle 3-6 und Tabelle 3-7). Dafür werden im Frühjahr an den Eider-Zuläufen Durchflüsse gemessen. Ziele sind ein Vergleich der angegebenen Pumpleistung mit dem gemessenen Durchfluss sowie die Erfassung des Durchflusses in den wenigen vorhandenen Freiläufen (LKN.SH, 2020).

Tabelle 3-6: Binneneiderzuflüsse

Binneneider	Gemessen am	Bemerkung
Südfeld-Oldenkoog	13.2.2020	
Steinschleuse	Messung in 2021	
Hohner See	Messung in 2021	
Mühlenau	Messung in 2021	
Tielenau	13.02.2020	
Wallener Au	24.02.2020	Messdaten müssen noch geprüft werden
Hennstedt	24.02.2020	Messdaten müssen noch geprüft werden

Tabelle 3-7: Tideeiderzuflüsse

Tideeiderzuflüsse	Gemessen am	Bemerkung
Katingsiel (Freilauf)	Messung in 2021	
Spitzsiel (Freilauf)	Messung in 2021	
Reimersbude	Messung in 2021	
Saxfähre	13.02.2020	
St. Annen	13.02.2020	
Nesserdeich	13.02.2020	Messdaten müssen noch geprüft werden

Tideeiderzuflüsse	Gemessen am	Bemerkung
Schülper Siel	13.02.2020	
Schülper Siel (Freilauf)	Messung in 2021	

3.2.2.3 Sondermessprogramm: Alte Sorge, Neue Sorge und Broklandsau

Tabelle 3-8: Größere Zuflüsse

Gewässer	Messpunkte
Alte Sorge	Steinschleuse – Alte Schlote – Neue Schlote
Alte Sorge	Steinschleuse – Fünfmühlen – Börmerkoog
Neue Sorge	DMA Sandschleuse – Bennebek (Meggerdorf) – Pegel Bennebek
Broklandsau	DMA Broklandsau-Schöpfwerk – Westermoor - Damnbrück

Tabelle 3-9: Liste der Wasserstandspegel im Untersuchungsgebiet Alte Sorge / Steinschleuse, die vom Eider-Treene-Verband betrieben werden. W-Pegel bei Schöpfwerken sind hier nicht gelistet.

	W- Pegel	Einzugsgebiet/ Gewässer	Fläche des oberirdischen Einzugsgebietes (km ²)	Pegel-Nullpunkt (m NHN)	Beobachtungsbeginn	Zeitliche Auflösung
1	Kummel-dammschloote				19.02.2019	15 min
2	Pegel 1 AuRa	Alte Sorge, Marschdamm			17.06.2020	15 min/ 30 min

	W- Pegel	Einzugsgebiet/ Gewässer	Fläche des oberirdischen Einzugsgebietes (km ²)	Pegel-Nullpunkt (m NHN)	Beobachtungsbeginn	Zeitliche Auflösung
3	Pegel 3 AuRa	Alte Sorge, Fünfmühlendeich			30.11.2020	30 min
4	Pegel 4 AuRa	Alte Sorge, Fünfmühlendeich			15.05.2020	15 min / 30 min
5						

3.3 Pegel im Grundwasser

Das Land SH betreibt im Bereich des oberirdischen Einzugsgebiets der Eider 53 Grundwassermessstellen, welche in den oberflächennahen Grundwasserkörpern liegen. 27 der Messstellen liegen unterhalb einer Abdeckschicht und weisen gespannte Grundwasserverhältnisse auf. Die folgende Abbildung 3-2 zeigt die Verteilung der Grundwassermessstellen im Einzugsgebiet.

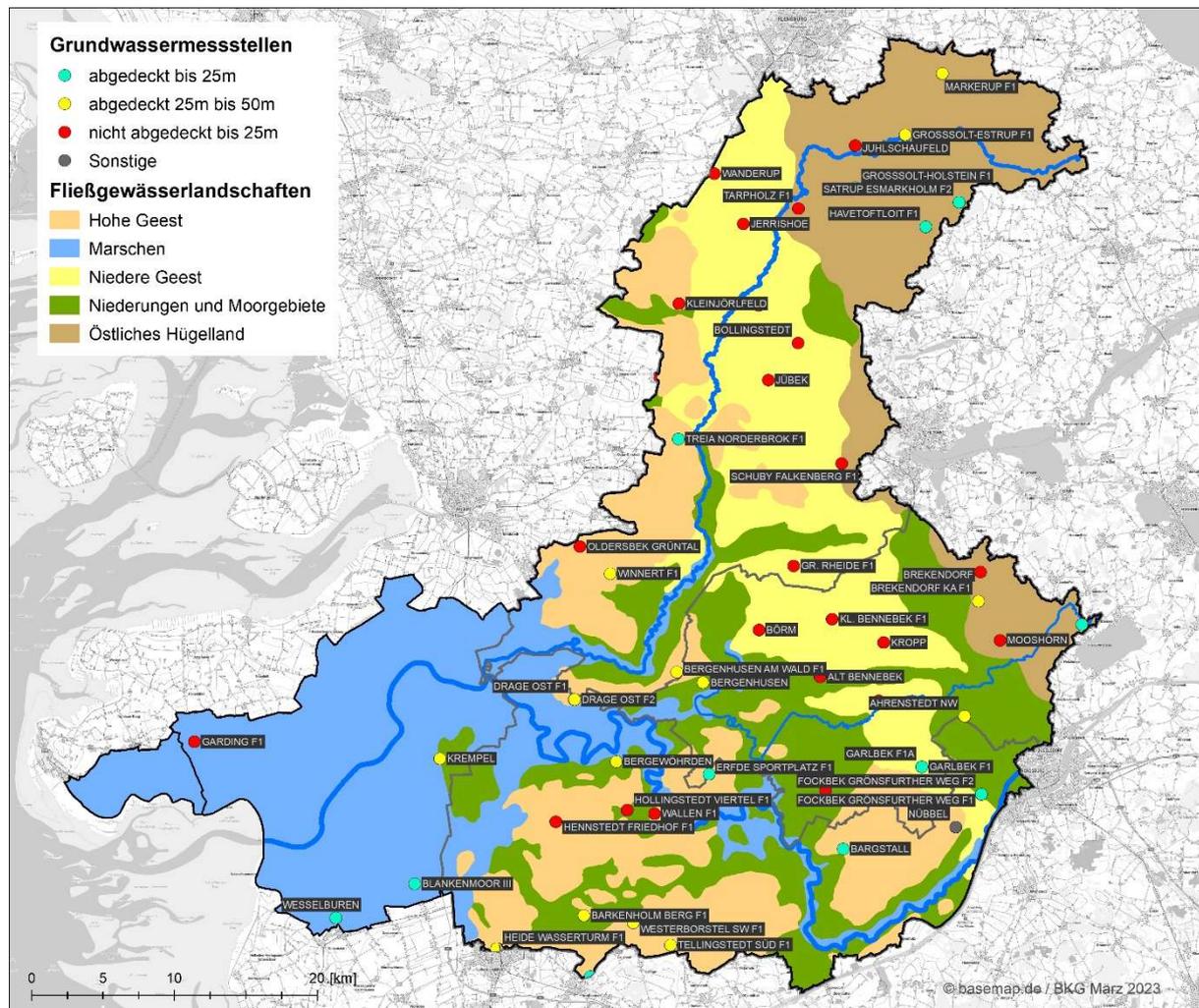


Abbildung 3-2: Lage der Grundwassermessstellen; Datengrundlage: Messstellen Land SH, Fließgewässerlandschaften LfU

3.4 Datenerhebungen zur Morphologie der Treene und der Eider des Landes SH

3.4.1 Morphologische Datenerhebungen der Eider

Auf Basis der verfügbaren Vermessungen des LKN.SH aus den Quellen der sogenannten Eiderkarten sowie der Wattgrundkarten wurden digitale Geländemodelle erstellt. Dabei waren Daten aus bereits digitalisierten und vektorisierten Isolinienkarten aus früheren Jahrzehnten ebenso zu verwenden wie aktuelle digitale hydrographische Daten und Laserdaten. Es entstanden 114 Geländemodelle als Teil- oder Gesamtmodell in einer Auflösung von einem Meter. Diese Daten wurden im November 2020 zur Verfügung gestellt.

Ergänzt werden diese Modelle durch das DGM-W der Eider aus 2016/2017, das durch das damalige WSA Tönning beauftragt wurde.

3.4.2 Morphologische Datenerhebungen der Treene

Für den Bereich von Friedrichstadt bis Hollingstedt in einer Länge von 33 km wurde auf Basis der hydrographischen Vermessungen der Gewässersohle von 2015 bis 2017 und der Laserdaten aus der landesweiten Laserbefliegung 2005 für die Uferbereiche und der angrenzenden Flächen ein digitales Geländemodell in einer Auflösung von einem Meter erstellt (Abbildung 3-3).

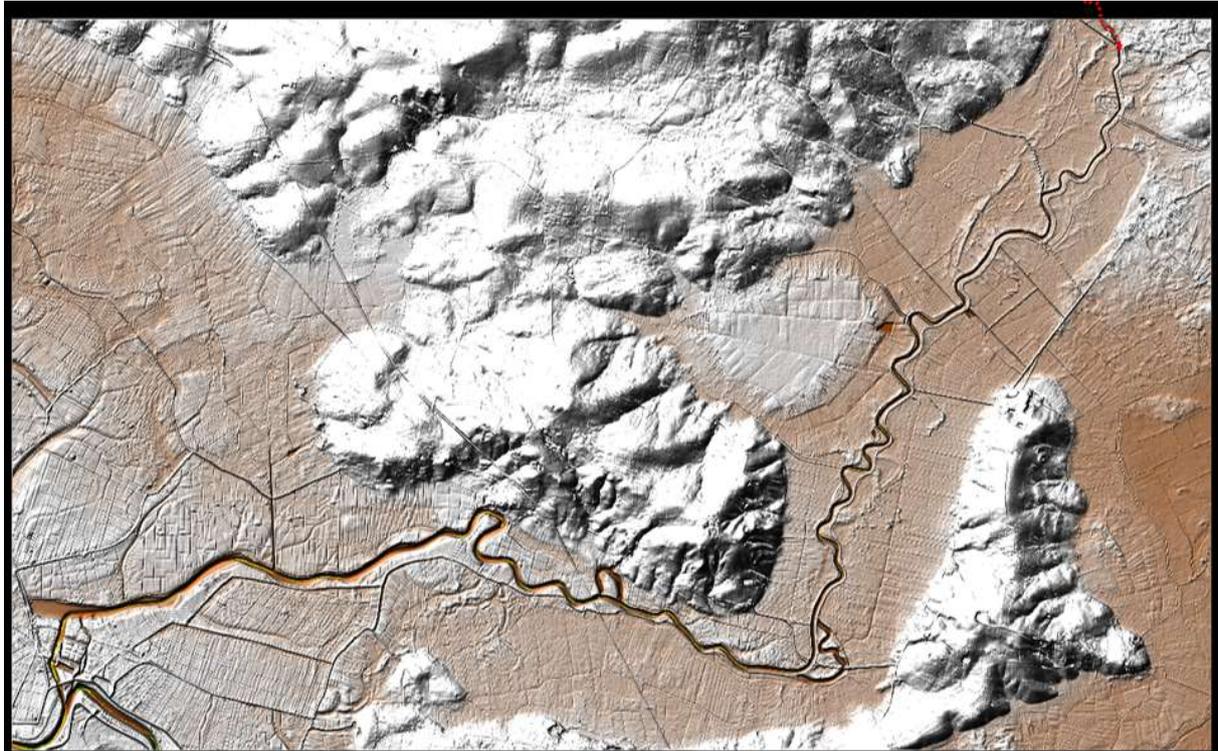


Abbildung 3-3: DGM Treene zwischen Friedrichstadt und Hollingstedt; Quelle: LKN.SH

Oberhalb von Hollingstedt bis Eggebek wurde die Treene auf einer Länge von 30 km profilhaft vermessen. Dabei wurden in 340 Profilen die Gewässersohle und die Uferbereiche erfasst. Diese Daten wurden im Dezember 2019 zur Verfügung gestellt.

Ergänzend liegen Daten aus einer Profilvermessung der Treene von 1989 vor.

Die Treene wurde in dem Bereich von Friedrichstadt bis Hollingstedt in einer Länge von 33 km profilhaft vermessen. Dabei wurden in 115 Profilen die Gewässersohle und die Uferbereiche einschließlich der Treene-Deiche erfasst. Das analoge Datenmaterial wurde digitalisiert und vektorisiert.

Auf einer Strecke von knapp 30 km wurde zwischen Friedrichstadt bis oberhalb von Hollingstedt rechts- und linksseitig ein Deichkronennivellement durchgeführt.

4. Komponenten des Modellsystems

Im Projekt „Zukunft Eider“ werden drei zentrale Modelle aufgebaut:

- ein dreidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell der Außen- und Tideeider (3D-HN-Modell)
- ein eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell der Tide- und Binneneider sowie für Abschnitte von Treene, Alter und Neuer Sorge (1D-HN-Modell)
- ein Wasserhaushaltsmodell (WHM) für das gesamte Einzugsgebiet der Eider

Den verschiedenen Modellen liegen unterschiedlichste Modellansätze bzw. Modellierungsverfahren zu Grunde, die in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert werden. Die räumliche Ausdehnung der Modelle ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Während sich die HN-Modelle an den Gewässerläufen orientieren und die dortigen Strömungsprozesse sowie Bauwerkssteuerungen nachbilden, erstreckt sich das Wasserhaushaltsmodell auf die gesamte Einzugsgebietsfläche der Eider, um die dominierenden Prozesse des Wasserkreislaufs nachzubilden und die Zuflüsse zum Gewässersystem zu simulieren. Letztere stellen auch die Randbedingungen zu den HN-Modellen dar. Das 3D-HN-Modell wird durch die BAW erstellt. Das Wasserhaushaltsmodell sowie das 1D-HN-Modell liegen in der Zuständigkeit der BfG.

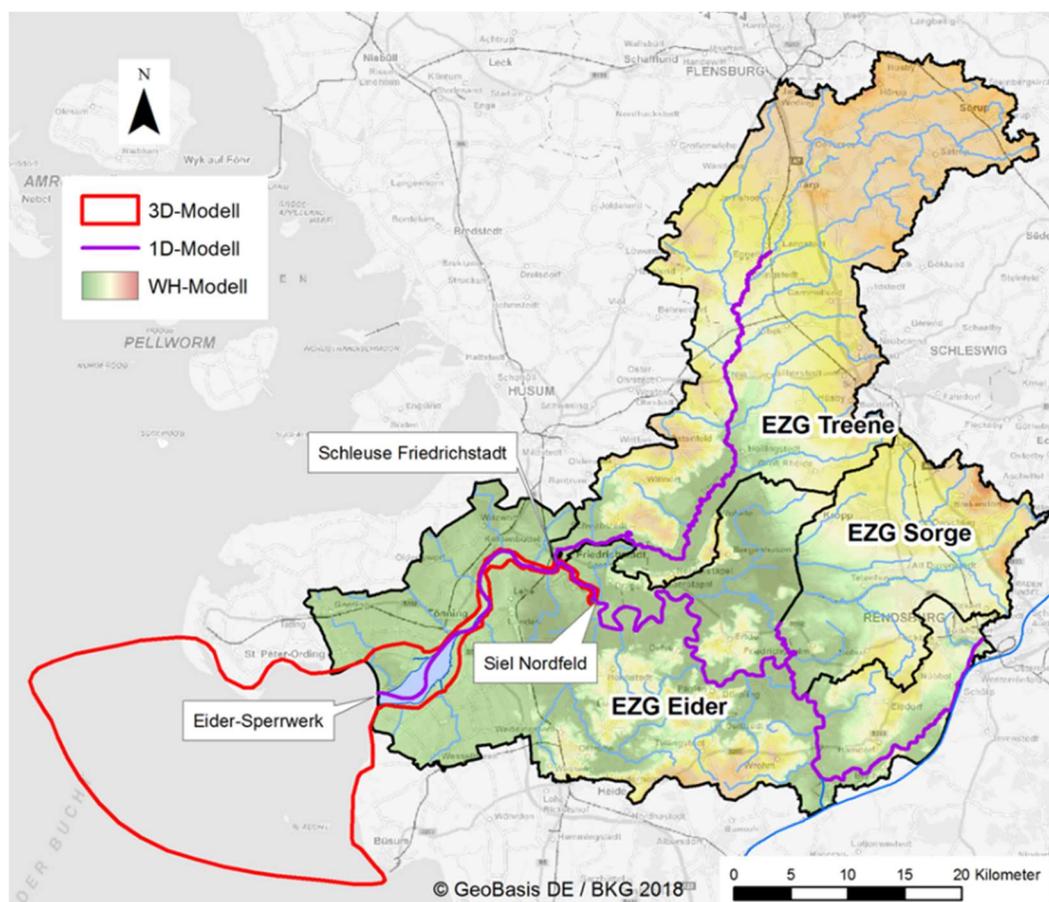


Abbildung 4-1: Übersicht der drei zentralen Modellinstrumente im Projekt „Zukunft Eider“

Abbildung 4-2 stellt in schematischer Form das Zusammenspiel der Modelle dar. Das Wasserhaushaltsmodell berechnet die Abfluss-Randbedingungen für die HN-Modelle. Das 1D-HN-Modell ist aufgrund seiner hohen Rechengeschwindigkeit im Vergleich zum 3D-Modell u.a. für eine Vorauswahl an Szenarien geeignet, die anschließend für die Tideeider detaillierter mit dem 3D-HN-Modell untersucht werden können, auch in Bezug auf Fragen zum Sedimenttransport.

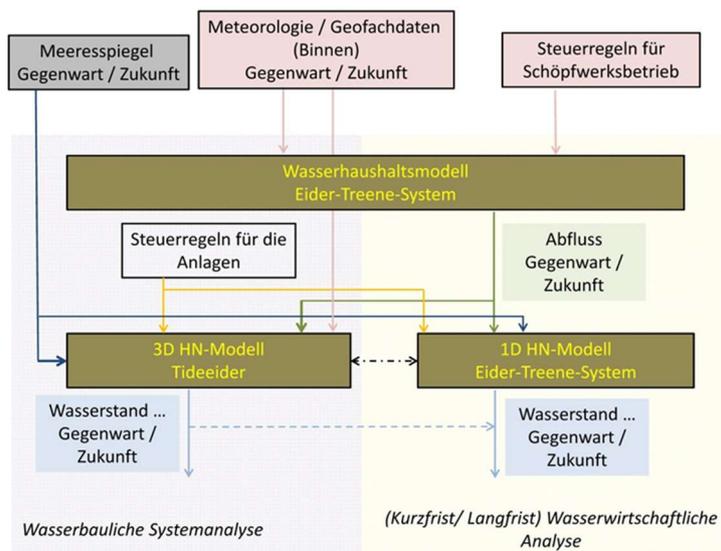


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Verknüpfung von Daten und Modellen im Projekt „Zukunft Eider“

4.1 Modellierungsverfahren UNTRIM²

Für die wasserbauliche Systemanalyse wurde ein dreidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell der Außen- und Tideeider aufgebaut. Das 3D-HN-Modell basiert auf dem mathematischen Verfahren UNTRIM² (Casulli und Walters 2000). UNTRIM² setzt die Methode der Finiten Differenzen und Finiten Volumen ein. Es dient der Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. Weitere Informationen sind zu finden unter https://wiki.baw.de/de/index.php/Mathematisches_Verfahren_UNTRIM). Das 3D-HN-Modell der Außen- und Tideeider berechnet folgende physikalische Parameter:

- Wasserstand
- Strömungsgeschwindigkeit
- Salzgehalt
- Wassertemperatur

Die Ausdehnung des Modellgebiets ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Der Aufbau und die Kalibrierung und Validierung des 3D-HN-Modells der Außen- und Tideeider ist abgeschlossen (Siegmann et al. 2022).

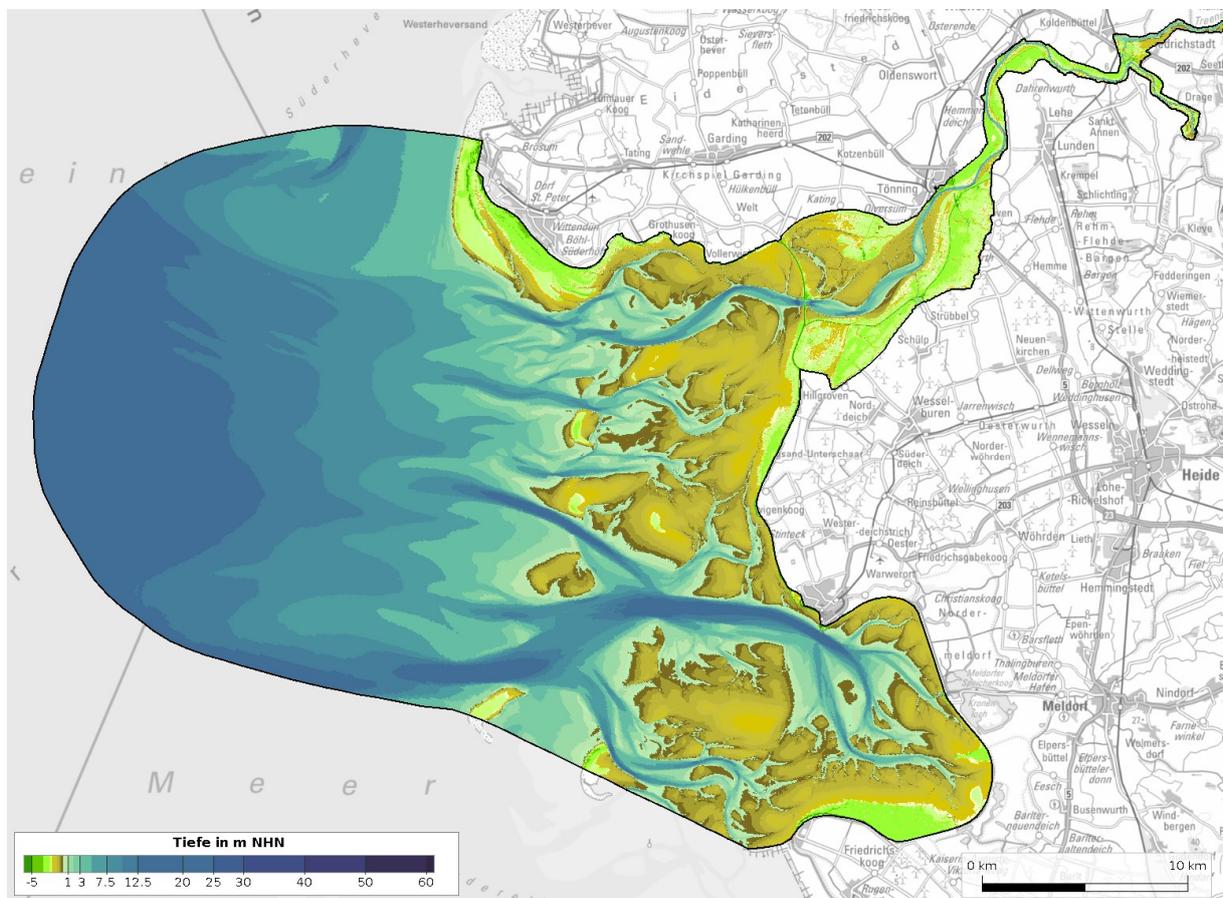


Abbildung 4-3: Übersicht des Modellgebiets des 3D-HN-Modells der Außen- und Tideeider, Hintergrundkarte DTK250 © GeoBasis-DE / BKG (2021)

Ursprünglich war im Projektplan von „Zukunft Eider“ das Berechnungsjahr 2016 für die Validierung und Kalibrierung des Modells vorgesehen. Da für 2016 keine Messungen der Salzgehalte vorlagen, wurde 2017 als Berechnungsjahr gewählt. Das 3D-HN-Modell wird aktuell genutzt, um Systemstudien zu verschiedenen Optimierungsvarianten in der Unterhaltung durchzuführen (siehe 5.3 Identifizierung von Optimierungspotentialen).

4.2 Modellierungsverfahren SediMorph

Bei dem mathematischen Verfahren SediMorph (Malcherek et al. 2002) handelt es sich um ein numerisches Modell des Sedimenttransports und der Morphodynamik, welches die Prozesse in einem Gewässerboden dreidimensional simuliert. SediMorph berechnet unter anderem die zeitvariable Sohlrauheit in Abhängigkeit des Oberflächensedimentes und der Formrauheit. Diese Sohlrauheit wird für das 3D-HN-Modell genutzt, um die Wasserstände

zu kalibrieren. Weitere Informationen zu SediMorph sind zu finden unter https://wiki.baw.de/de/index.php/Mathematisches_Verfahren_SEDIMORPH.

Das aufgestellte 3D-HN-Modell wurde 2022 um die Berechnung von suspendierten Sedimenten in der Wassersäule erweitert. Das Modell liefert, verglichen mit Werten aus der Literatur (Ricklefs 1989), plausible Ergebnisse. Aktuelle Messungen der Konzentration suspendierter Sedimente lagen nicht vor. Um das Modell mit Messdaten kalibrieren zu können, wurde daher zur Modellierung des Sedimenttransportes auf das Berechnungsjahr 2020 gewechselt. Hier liegen Trübungsmessungen der Messkampagne 09/2020 an der Eider vor (Siegmann et al. 2021b). Die Kalibrierung soll 2023 erfolgen. Die seeseitigen Randwerte wurden von der BAW in Fortsetzung des Projektes EasyGSH berechnet (Hagen et al. 2020). Die Systemstudien mit dem Sedimenttransportmodell zeigen eine an die Hydrodynamik angepasste Sedimentbelegung (Hirschhäuser et al. 1998). Die sich ergebende Sedimentbelegung passt gut zu den Ergebnissen der Sedimentprobennahme 08/2021 (Siegmann und Kösters 2021). Weitergehende Studien sollen für das Berechnungsjahr 2020 erfolgen.

4.3 Modellsystem SOBEK

Das Modellsystem SOBEK wird von Deltares (www.deltares.nl, niederländisches Forschungsinstitut, ehemals Deft Hydraulics) vertrieben und weiterentwickelt. SOBEK ist ein modular aufgebautes Softwarepaket zur Modellierung der eindimensionalen Gerinnehydraulik. SOBEK kommt im Projekt „Zukunft Eider“ in der Version SOBEK3 zum Einsatz.

Die numerische Lösung der Differenzialgleichungen (Kontinuitäts- und Impulsgleichung) erfolgt in SOBEK auf Basis des impliziten Finite-Differenzen-Verfahrens. Hierzu wird die Modellstrecke als ein gestaffeltes Berechnungsnetz diskretisiert. Es entstehen diskrete Berechnungsknoten entlang des Flussschlauches sowie der zugehörigen Fließzweige. Dabei werden die Wasserspiegel auf den Berechnungsknoten, die Abflüsse auf den Fließzweigen zwischen den Knoten vorgehalten. Sind Bauwerke definiert, wird in dem entsprechenden Fließzweig die Impulsgleichung durch eine Bauwerksgleichung ersetzt oder es werden Rauheitsterme ergänzt. Das Berechnungsverfahren in SOBEK kann sowohl mit unter- und überkritischen Strömungszuständen sowie Fließwechseln umgehen. Zudem enthält es einen robusten Algorithmus für das Nass- und Trockenfallen von Berechnungsabschnitten. (Stelling & Duinmeijer, 2003). Die eindimensionale Gerinnehydraulik kann in SOBEK um die Aspekte Gewässergüte, Sedimenttransport und Morphodynamik erweitert werden. SOBEK ermöglicht grundsätzlich auch eine zweidimensionale sowie hybride Modellierung von Fließprozessen (laterale Kopplung eindimensionaler Gerinnehydraulik mit zweidimensionalem Abflussgeschehen im Vorland) (Hydrotec, 2022).

Im Projekt „Zukunft Eider“ kommt SOBEK mit den Modulen D-Flow1D und D-Real Time Control (D-RTC) zum Einsatz. Das D-RTC-Modul dient der Abbildung der zahlreichen Bauwerke nebst ihrer Steuerung. D-RTC ist ein flexibles Steuerungsmodul, mit dem auch komplexe Steuer- / Betriebsvorschriften abgebildet werden können. Zudem besteht die Möglichkeit, Python-Skripte direkt auf Zeitschrittbasis in die Simulationsrechnung zu integrieren, um somit beliebige Steuerungsregeln in das hydrodynamische Modell einzubauen. Die Steuerungsregeln und ihre logische Verknüpfung können in Form von Entscheidungsbaumdiagrammen in der Benutzeroberfläche von SOBEK3 mithilfe von Flow Charts übersichtlich visualisiert werden. SOBEK-Modelle bestehen bereits für eine Vielzahl an Bundeswasserstraßen und sind im operationellen Vorhersageeinsatz bei der WSV und der BfG.

4.4 Hydrologisches Modellframework HydPy

Das Modellframework HydPy ist ein Modellsystem für die Wasserhaushaltsmodellierung. Es ermöglicht die einheitliche Entwicklung und Anwendung unterschiedlicher hydrologischer Modellkonzepte. Innerhalb des Frameworks programmierte Modelle sind gleich bedienbar und lassen sich frei miteinander kombinieren. Definierte Programmierstandards und die Automatisierung zahlreicher Prozessabläufe, z.B. zur Durchführung von Testrechnungen und zur Aktualisierung der Online-Dokumentation, stellen eine hohe Qualität der implementierten Modelle sicher. Die hierfür adaptierten Techniken entstammen und folgen den Ideen der Open-Source-Bewegung. Die Programmierung erfolgt weitgehend in Python. Der Quelltext und weitere entwicklungsbezogene Informationen finden sich unter <https://github.com/hydp-dev/hydp>.

Ausgangspunkt der Entwicklung von HydPy war das am Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik der Ruhr-Universität Bochum für die Forschung entwickelte Modellsystem HWU. Im Rahmen des Forschungsprojektes Seamless Prediction (vgl. <https://doi.bafg.de/BfG/2020/BfG-2026.pdf>) erfolgten im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde zahlreiche praxisrelevante Funktionalitätserweiterungen.

4.5 Wasserhaushaltsmodellsystem WALRUS

WALRUS (Brauer et al., 2014) ist im Ursprung ein konzeptionelles, generalisierendes³ hydrologisches Modellsystem, welches speziell für die Abbildung der Prozesse in kleinen Tieflandeinzugsgebieten (0,5 bis 6,25 km²) entwickelt wurde: Kapillaraufstieg, dynamische

³ gelumpstes Modell

Aufteilung zwischen schnellen und langsamen Fließwegen in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Bodenoberfläche, Verknüpfung der ungesättigten und gesättigten Bodenzone und Wechselwirkung zwischen Grund- und Oberflächenwasser. Es existieren darüber hinaus jedoch auch Weiterentwicklungen von WALRUS als semi-distributives Modellsystem mit einem zusätzlich implementierten Wassertransportmodell (Wijngaard et al., 2017).

Die Verknüpfung der ungesättigten und gesättigten Bodenzone erfolgt über das vertikale Profil des Bodenwasserhaushalts und wird bestimmt durch die gegensätzlichen Fließprozesse Perkolation (Abwärtsbewegung zum Grundwasser) und Kapillaraufstieg (Aufwärtsbewegung aus dem Grundwasser). Die gegenseitige Beeinflussung beider Zonen ist bei oberflächennah anstehendem Grundwasser stark ausgeprägt, da zu Zeiten der Perkolation zusätzlich Verdunstungsprozesse zu verzeichnen sind. Viele konzeptionelle Modelle separieren die ungesättigte Bodenzone und das Grundwasser, so dass nur die Abwärtsbewegung zum Grundwasser ohne Aufwärtsbewegung abgebildet werden kann. WALRUS enthält einen Parameter – das Bodenwasserdefizit - für das Bodenkompartment, der sowohl die gesättigte als auch die ungesättigte Bodenzone beschreibt. Durch die Berücksichtigung der Aufwärtsbewegung verringern sich die Scheitel der Abflussganglinien.

Zur Abbildung des Kapillaraufstiegs ist es erforderlich, den Oberflächenwasserstand zu modellieren (also den Wasserstand im Grabensystem modelltechnisch zu erfassen). Die Erhöhung der Bodenfeuchte kann durch langsame und schnelle Fließwege erfolgen. Langsame Fließwege sind zum Beispiel diejenigen durch kleine Bodenporen, wohingegen die schnellen Fließwege beispielsweise durch natürliche Makroporen und Dränsysteme definiert sind. Beide Prozesse werden in WALRUS über den Parameter „wetness-Index“ beschrieben. Versickerung und Entwässerung können über externe Zuflüsse beschrieben werden. WALRUS hat keinen Ansatz zur Modellierung der potenziellen Verdunstung. Sie ist als externe Randbedingung vorzugeben.

WALRUS ist mit fünf Kalibrierungsparameter ein parameterarmes, einfaches Modell.

1. Cw Wetness-Parameter,
2. CQ Quickflow reservoir Konstante,
3. Cv ungesättigte Bodenschicht (vadose Zone),
4. CG Grundwasserreservoir Konstante,
5. CS Bordvoller Abfluss.

Fünf (Boden)-Kompartimente werden in WALRUS unterteilt:

1. **Land-Oberfläche:** Niederschlagseingang (P) geht direkt in den Oberflächenwasserspeicher. Der Wetness-Index unterteilt den restlichen Niederschlag in einen schnellen Direktabfluss (PQ) und einen langsamen durch die Bodenmatrix perkolierenden Abfluss (Pv). Verdunstung reduziert Wasserhaushalt in ungesättigter Bodenzone und Oberflächenwasserspeicher.

2. **Ungesättigte Bodenzone** im Bodenspeicher: oberer Teil des Bodenkompartiments, enthält kapillaren Aufstieg und reicht von der Bodenoberfläche zum Grundwasserstand (dG). Trockenheit wird nur charakterisiert durch Bodenwasserdefizit (dv).
3. **Grundwasserzone** im Bodenspeicher: unterer Teil des Bodenkompartiments; Bereich unterhalb des Grundwasserstandes (dG), entspricht in der Regel der Tiefe des Grabensystems in trockenen Zeiten
4. **Schneller Abflussspeicher:** Makroporen, präferenzielle Fließwege; gesamtes Wasser, welches nicht die Bodenzone erreicht (fGS).
5. **Oberflächenwasser:** wird bestimmt durch eine untere Randbedingung (Grabentiefe) und hat keine obere Randbedingung. Der Abfluss wird simuliert durch Wasserstand im Oberflächenwasserreservoir.

5. Wasserbauliche Systemanalyse der Tideeider inkl. des Sedimentmanagements

5.1 Allgemeines

Die Tideeider ist von zentraler Bedeutung für die Hydrodynamik des Eider-Treene-Systems. Nur wenn in der Tideeider Tideniedrigwasser herrscht, können die Binneneider und die Treene entwässern. Zudem wird der Speicherraum der Tideeider bei extremen Entwässerungssituationen als Zwischenspeicher benötigt. Die vorhandenen Anlagen (Eider-Sperrwerk, Anlage Nordfeld, Schleusen Friedrichstadt) sollen so gesteuert werden, dass sich möglichst wenig Sediment in der Tideeider ablagert. Wirkung und Potenziale von Ufer- und Bühnenbauten sollen überprüft werden. Des Weiteren soll betrachtet werden, wie sich der Klimawandel und die morphologischen Veränderungen in Zukunft auf das Einzugsgebiet auswirken. Die Fragestellungen sollen mit Hilfe des 3D-HN-Modells und Sedimenttransportmodells untersucht werden (s. Kapitel 4 Komponenten des Modellsystems).

5.2 Beschreibung des Ist-Zustandes

5.2.1 3D-HN-Modell der Außen- und Tideeider

Auf Basis der ermittelten Grundlagen (3.1.1 Beschreibung des Ist-Zustandes - Grundlagenermittlung) wurde ein 3D-HN-Modell der Außen- und Tideeider aufgebaut. Das Modell wurde mittels dreier Spring-Nipp-Zyklen im Berechnungsjahr 2017 kalibriert und validiert. In den ausgewählten Zeiträumen traten durchgängig Tidehoch- und Tideniedrigwasser in der Tideeider ein. Kalibriert wurde für den Parameter Wasserstand. Validiert wurde zusätzlich für die Parameter Salzgehalt, Wassertemperatur und Strömungsgeschwindigkeit. Die Kalibrierung und Validierung des Modells wurde mit einem Validierungsdokument abgeschlossen (Siegmann et al. 2022).

Beim Aufbau des Modells war eine zentrale Herausforderung, die Steuerung der Sielöffnungen am Eider-Sperrwerk umzusetzen. Dafür wurden auf Grundlage von Aufzeichnungen und Betriebsprotokollen Sperrwerkszeitreihen erfasst. Mit diesen konnten die 5 Sielöffnungen getrennt gesteuert werden. Die seeseitigen Wasserstandsrandwerte entstammen dem übergeordneten Modell aus dem Projekt EasyGSH-DB (Hagen et al. 2020). Alle Oberwasserzuflüsse (Treene, Binneneider, sonstige Zuflüsse der Tideeider) wurden in das Modell integriert. Ebenso wurden Deiche und Dämme sowie das Eider-Sperrwerk über ein Bauwerksmodell abgebildet. Das aufgestellte 3D-HN-Modell ist sehr gut in der Lage, die Wasserstände in der Außen- und Tideeider zu berechnen. Abbildung 5-1 vergleicht die vom 3D-HN-Modell gerechneten Wasserstände (blau) mit den gemessenen (grau).

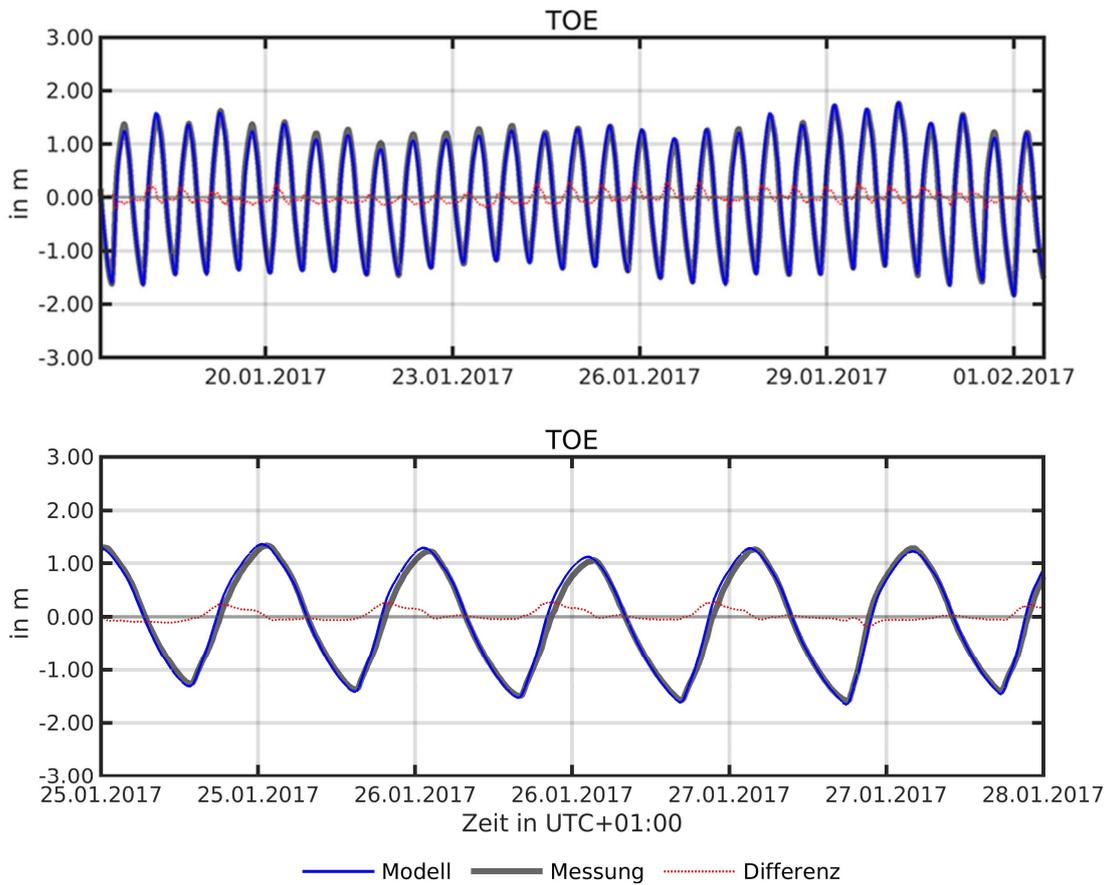


Abbildung 5-1: Wasserstände am Pegel Tönning im Kalibrierzeitraum

Abbildung 5-1 zeigt eine gute Übereinstimmung der Modellierung mit den Messungen. Sowohl im Kalibrierungszeitraum als auch im Validierungszeitraum mit 5 Sielöffnungen in Betrieb werden die geforderten Gütekriterien (root mean square error, BIAS, skill-score nach Willmott) sehr gut eingehalten. In Richtung Nordsee sowie im Oberlauf des Ästuars werden die Wasserstände leicht überschätzt. Im zentralen Bereich des Ästuars werden die Wasserstände exakt getroffen bzw. leicht unterschätzt. Lediglich im Validierungszeitraum mit 4 Sielöffnungen werden die Wasserstände an den Positionen Friedrichstadt und Nordfeld-Unterwasser nur akzeptabel getroffen.

Anhand von Beispielen außerhalb der Kalibrierungs- und Validierungszeiträume wird gezeigt, dass für alle Betriebs- und Einsatzarten die Wasserstände in der Tideeider über die implementierte Wehrsteuerung sehr gut abgebildet werden können. Bei den Strömungsgeschwindigkeiten wurden die Modellergebnisse für das Jahr 2017 mit den Ergebnissen der mobilen Strömungsmessung der Messkampagne 09/2020 (Siegmann et al. 2021b) verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung. Das 3D-HN-Modell der Außen- und Tideeider ermöglicht es, Strömungsverhältnisse bei unterschiedlichen hydrologischen Situationen zu berechnen und die Wirkung der Steuerung der wasserbaulichen Anlagen nachzubilden. Das

3D-HN-Modell wird im Weiteren genutzt, um wasserbauliche Systemanalysen und Sensitivitätsstudien durchzuführen und Optimierungspotentiale aufzuzeigen.

5.2.2 Erweiterung Sedimenttransport

Das 3D-HN-Modell wurde erweitert, um den Transport von Sedimenten zu berechnen. Das Modell liefert plausible Berechnungsergebnisse. Startend mit einer homogenen Sedimentbelegung werden die Sande und Schluffe so im System verteilt, wie es einer natürlichen Sedimentverteilung entspricht. Die berechneten Schwebstoffkonzentrationen liegen in einer Größenordnung, wie sie auch von Ricklefs (1989) gemessen wurden. Um das Modell kalibrieren zu können, muss auf das Berechnungsjahr 2020 gewechselt werden. Im Rahmen der Messkampagne 9/2020 wurden Trübungswerte gemessen, über die Schwebstoffkonzentrationen errechnet werden können. Diese Messdaten ermöglichen es das Sedimenttransportmodell zu kalibrieren. Die seeseitigen Randwerte stehen seit kurzem zur Verfügung. Es ist geplant, Anfang 2023 das Berechnungsjahr zu wechseln und dann das Modell zu kalibrieren.

5.3 Identifizierung von Optimierungspotentialen

Um die Ablagerung von Sedimenten in der Tideeider zu minimieren und die Entwässerung des Eider-Einzugsgebietes zu verbessern, sollen Systemstudien durchgeführt werden. Es sollen Optimierungspotentiale in der Steuerung der Anlagen und der Gewässerunterhaltung identifiziert werden. Dafür soll das aufgestellte 3D-HN-Modell sowie das um den Sedimenttransport erweiterte Modell eingesetzt werden.

5.3.1 Optimierungsvarianten

Im Rahmen des 6. Fachgesprächs (Besprechungsübersicht s. Kapitel 8.1 Projektkommunikation) wurde mit allen fachlichen Projektbeteiligten abgestimmt, welche Optimierungsvarianten untersucht werden sollen.

Für die Anlagensteuerung werden folgende Varianten betrachtet:

1. Eider-Sperrwerk: Tidebetrieb
2. Eider-Sperrwerk: Flutdrosselung
3. Eider-Sperrwerk: Flut- und Ebbedrosselung
4. Eider-Sperrwerk: Sielbetrieb (durchgehend geschlossen über mehrere Wochen bei Bedarf)
5. Eider-Sperrwerk: Sielbetrieb (eine Tide geöffnet, die nächste geschlossen)

6. Eider-Sperrwerk: Schleusenspülung
7. Eider-Sperrwerk: (n-1)-Betrieb
8. Nordfeld mit Spülbetrieb
9. Nordfeld ohne Spülbetrieb
10. Eider-Sperrwerk: veränderte Flutdrosselung (andere Steuerungsschemen testen)
11. Eider-Sperrwerk: veränderte Ebbedrosselung (andere Steuerungsschemen testen)

Für die Gewässerunterhaltung werden nachfolgende Varianten gerechnet:

1. Tideeider: mit Strombauwerken
2. Tideeider: ohne Strombauwerke
3. Tideeider: veränderte Strombauwerke
4. Tideeider: Vergrößerung des Fließquerschnitts
5. Tideeider: Freihaltung Zuläufe / Außentiefs durch Sedimententnahme und -umlagerung
6. Tideeider: Sedimentationsfallen
7. Tideeider: Maßnahmen des Bundesprogrammes Blaues Band Deutschland. Aktuell ist keine konkrete Maßnahme vorgesehen.
8. Tideeider: zusätzlicher Flutraum

Die Effekte unterschiedlicher Uferunterhaltungen sind zu kleinräumig, um die mit den aufgebauten Modellen (3D-HN-Modell, Sedimenttransportmodell) abzubilden.

Im Rahmen der Auswertung historischer Höhenmodelle des LKN.SH wird die Liste noch um einen Punkt erweitert:

9. Beseitigung von Verengungen in der Tideeider

Es werden alle Optimierungsvarianten gerechnet. Anschließend werden auch Kombinationen der Varianten modelliert. Über die Berechnung der Optimierungsvarianten hinaus muss ihre Machbarkeit abgeschätzt werden.

5.3.2 Erste Ergebnisse aus den Systemstudien der Optimierungsvarianten

Nachfolgend werden erste Ergebnisse von Systemstudien mit dem 3D-HN-Modell zu den Optimierungsvarianten „Unterhaltung“ gezeigt. Für die Varianten wird das Gitter des kalibrierten 3D-HN-Modells verändert. Die Auswertung erfolgt entlang eines Längsschnittes in Fahrrinnenmitte von km 78,8 (Nordfeld) bis km 110 (Eider-Sperrwerk). Berechnet werden Tidekennwerte des Wasserstandes, der Strömung und des Salzgehaltes im Kalibrierungszeitraum (17.01.2017 bis 01.02.2017). Es werden nur die Ergebnisse für den Wasserstand gezeigt. Wenn die Ergebnisse des Ist-Zustands mit denen der Optimierungsvarianten verglichen werden, wird deutlich, was sich durch sie verändert.

2023 ist geplant, unter Hinzunahme des Sedimenttransportmodells alle Optimierungsvarianten zu berechnen. Auf dieser Grundlage wird ein Optimierungsvorschlag erarbeitet.

5.3.2.1 Strombauwerke

Die Strombauwerke (Quer-Buhnen) in der Tideeider beginnen bei Eider-km 99 und setzen sich stromaufwärts bis Nordfeld fort. Es werden drei Modellvarianten gerechnet. Die erste Modellvariante beinhaltet keine Buhnen. Die zweite Modellrechnung rechnet mit Buhnen in den Abmessungen, wie sie 2017 aufgemessen wurden (Buhnen Bestand). In einem dritten Rechenlauf werden die Buhnen so berücksichtigt, wie sie ursprünglich gebaut wurden (Buhnen Bau-Zustand). Die Abbildung 5-2, Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen die Ergebnisse der Tidekennwertanalyse des Wasserstandes.

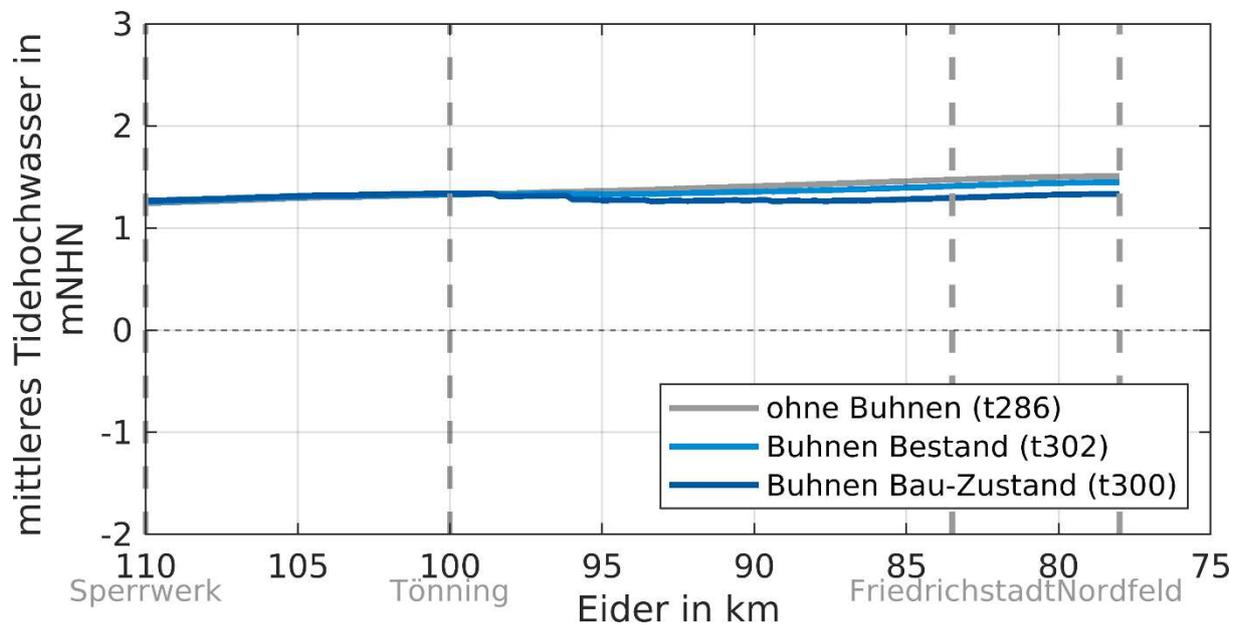


Abbildung 5-2: Optimierungsvarianten Strombauwerke, mittleres Tidehochwasser

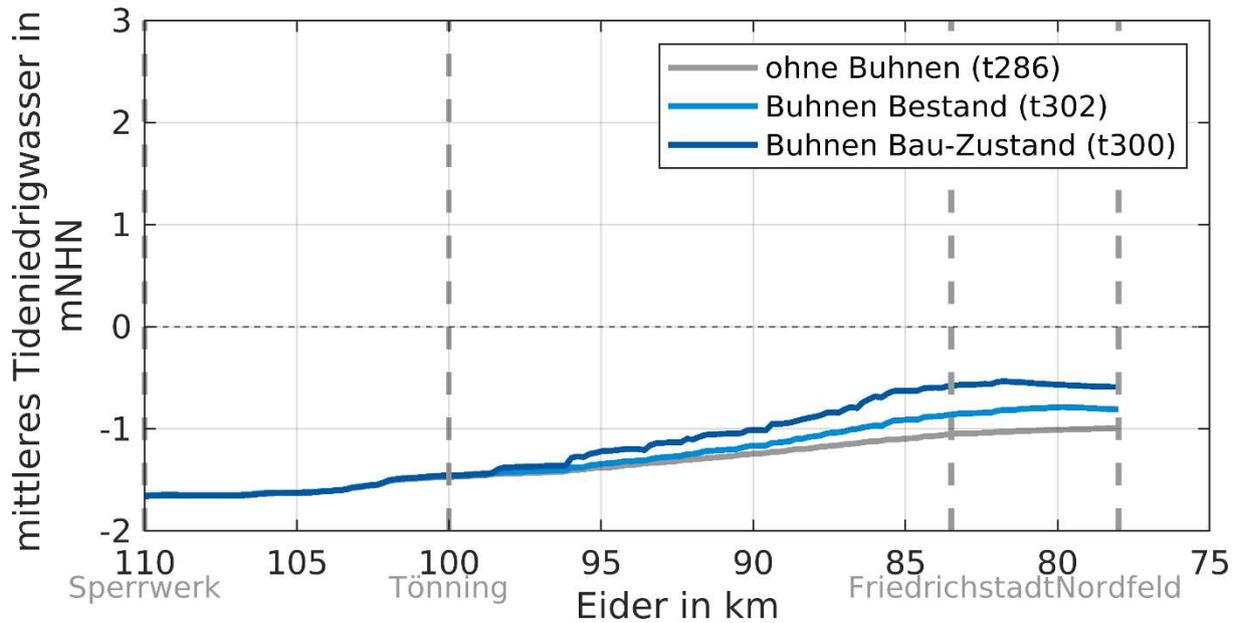


Abbildung 5-3: Optimierungsvarianten Strombauwerke, mittleres Tideniedrigwasser

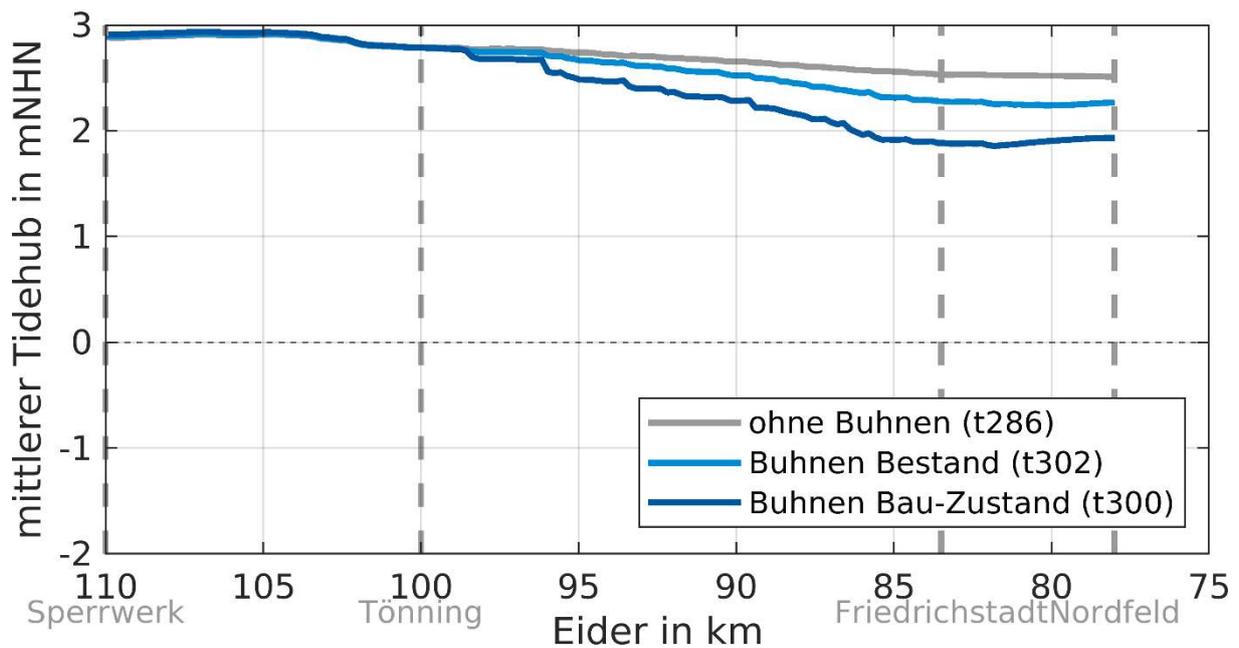


Abbildung 5-4: Optimierungsvarianten Strombauwerke, mittlerer Tidehub

Mittleres Tidehochwasser (MThw): Bei allen Varianten erhöht sich erwartungsgemäß das MThw in Richtung Nordfeld. Vom Eider-Sperrwerk bis Eider-km 99 ist das MThw in den Varianten nahezu gleich. Flussauf von Eider-km 99 starten die Buhnen. Das MThw der Rechenläufe mit Buhnen ist niedriger als ohne. Bei den Buhnen im ursprünglichen Bauzustand fällt das MThw am niedrigsten aus.

Mittleres Tideniedrigwasser (MTnw): Das MTnw zeigt in allen Untersuchungsvarianten vom Eider-Sperrwerk bis Eider-km 99 ähnliche Werte. Flussauf von Eider-km 99 erhöht sich das MTnw für die Varianten mit Buhnen. Am stärksten ausgeprägt ist das MTnw bei den Buhnen in den größeren Abmessungen des Bauzustandes. Die Buhnen engen das Gewässerprofil bei Niedrigwasser ein. Folglich zeigen diese Varianten die höheren Tideniedrigwasser.

Mittlerer Tidehub (MThb): Der MThb ist vom Eider-Sperrwerk bis Eider-km 99 ähnlich in allen Varianten. Die Unterschiede im MThb nehmen flussauf ab Eider-km 99 zu. Der MThb nimmt für die Varianten mit Buhnen stärker ab. Durch die Buhnen wird mehr Reibung ins System gebracht. Je größer die Buhnen sind (Buhnen Bau-Zustand) desto größer ist die Reibung, desto niedriger ist der Tidehub.

5.3.2.2 Vergrößerung des Fließquerschnittes

Für diese Variante wird die Fahrrinne vom Eider-Sperrwerk bis nach Nordfeld auf 60 m verbreitert und flachere Stellen auf – 5 m NHN vertieft. Da die Fahrrinne am Eider-Sperrwerk breiter und tiefer ist als Richtung Nordfeld, fallen zur Anlage Nordfeld hin die Änderungen vergleichsweise größer aus. Abbildung 5-5 bis Abbildung 5-8 zeigen die Ergebnisse.

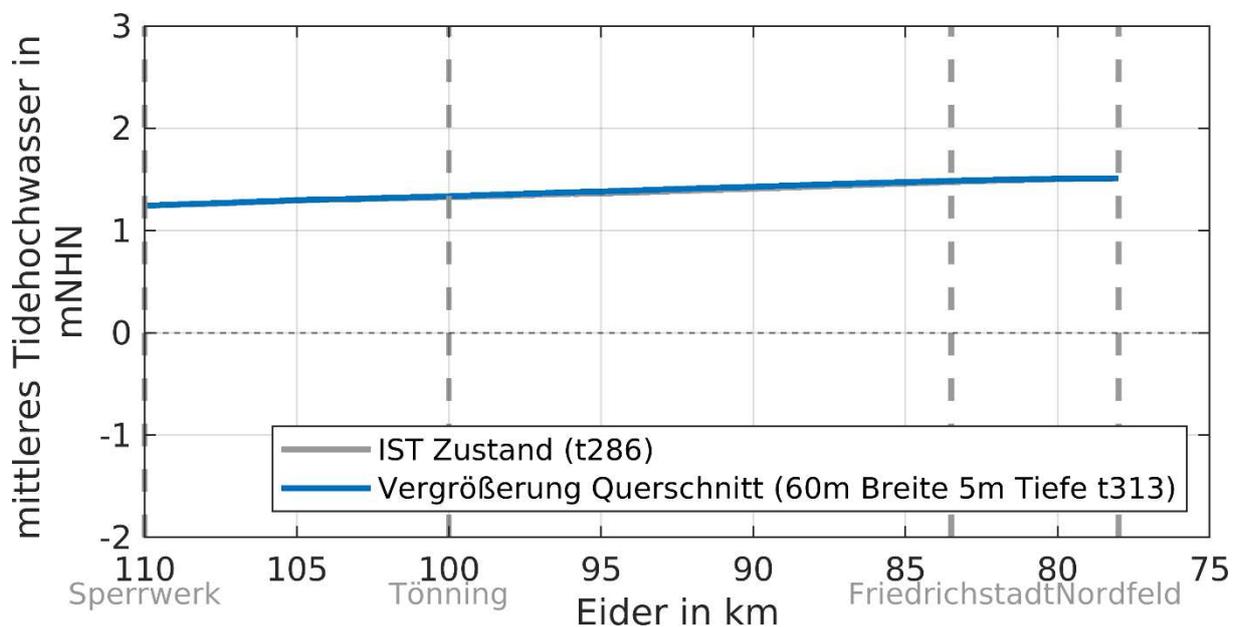


Abbildung 5-5: Optimierungsvariante Vergrößerung Fließquerschnitt, mittleres Tidehochwasser

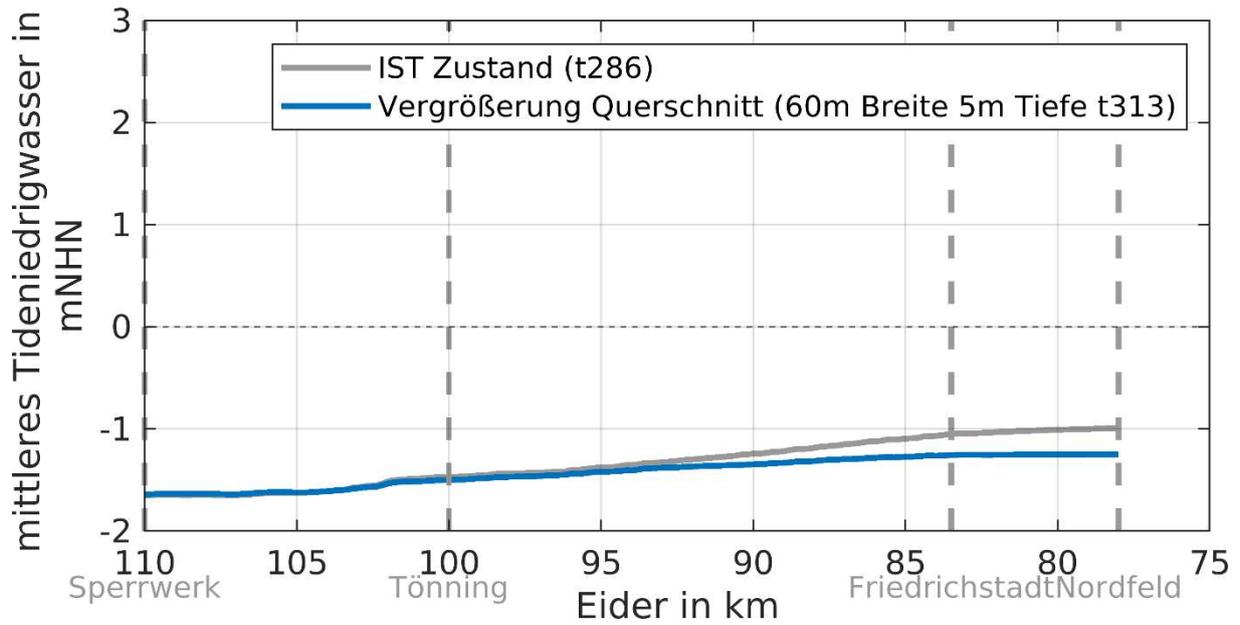


Abbildung 5-6: Optimierungsvariante Vergrößerung Fließquerschnitt, mittleres Tideniedrigwasser

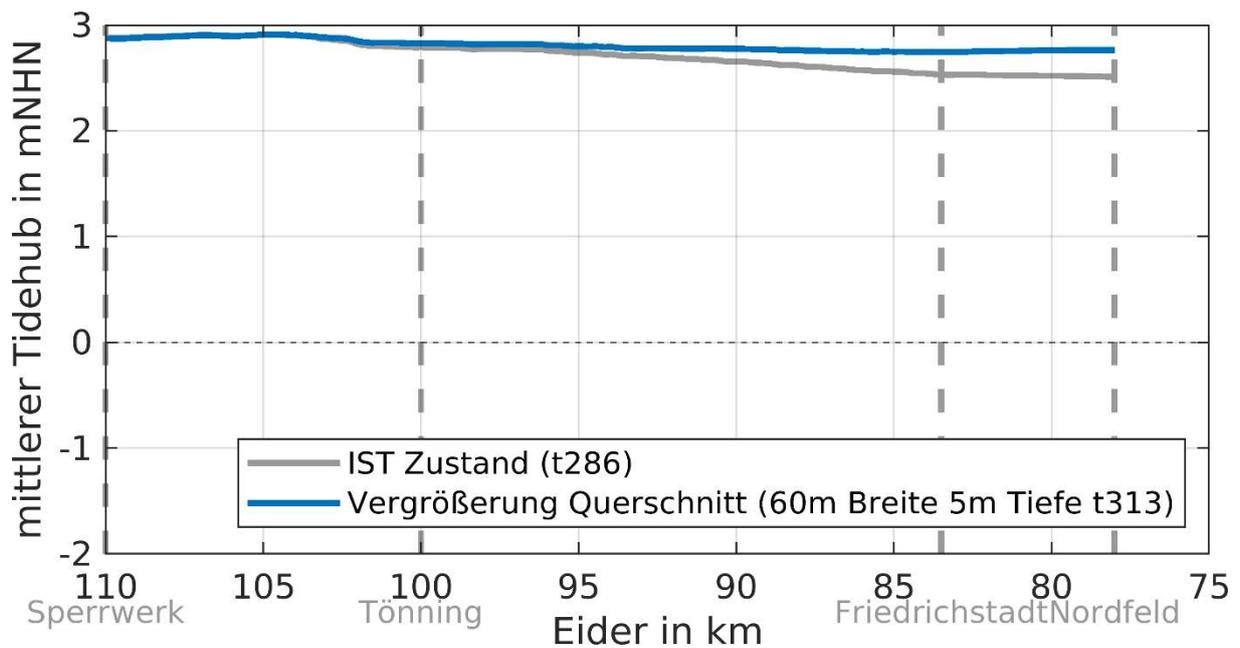


Abbildung 5-7: Optimierungsvariante Vergrößerung Fließquerschnitt, mittlerer Tidehub

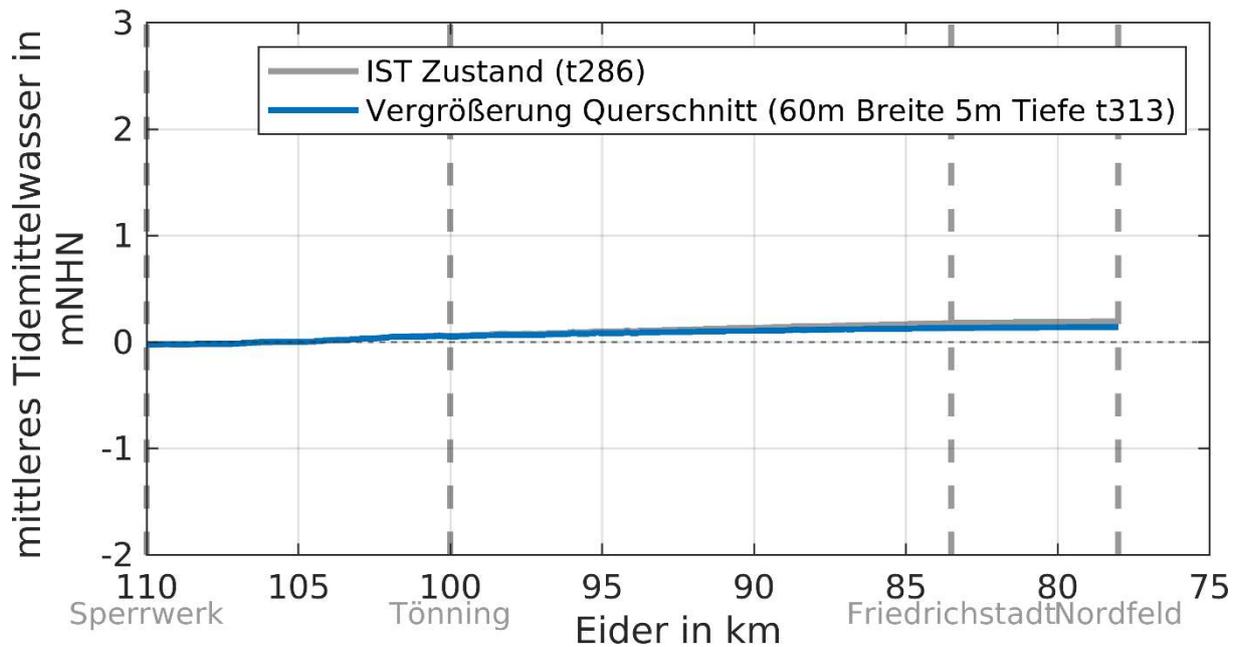


Abbildung 5-8: Optimierungsvariante Vergrößerung Fließquerschnitt, mittleres Tidemittelwasser

MThw: Wird der Fließquerschnitt vergrößert, erhöht sich das MThw zwischen Eider-km 105 und Eider-km 78 geringfügig.

MTnw: Bei größerem Fließquerschnitt ist das MTnw deutlich niedriger als im Ist-Zustand. Stromaufwärts werden die Unterschiede zwischen den Varianten immer größer. Am Eider-Sperrwerk ist das MTnw beider Varianten nahezu gleich, bei Nordfeld beträgt die Differenz 0,22 m.

MThb: Die Differenzen im MThb vergrößern sich vom Eider-Sperrwerk bis Nordfeld. Am Eider-Sperrwerk ist der MThb für beide Varianten gleich, bei Nordfeld beträgt die Differenz 0,22 m. Durch die Vergrößerung des Querschnittes erhöht sich der MThb.

Mittleres Tidemittelwasser (MTmw): Das MTmw vom Ist-Zustand und der Variante unterscheiden sich bis Tönning kaum. Ab Tönning steigt das MTmw der Variante langsamer an als im Ist-Zustand. Durch die Vergrößerung des Fließquerschnittes sinkt das MTmw ab.

Wird der Fließquerschnitt vergrößert, erhöht sich das MThw geringfügig. Das MTnw nimmt deutlich ab, wodurch es insgesamt zu einer Erhöhung des MThb kommt.

5.3.2.3 Zusätzlicher Flutraum

Hier wird der Wiederanschluss von Wattflächen binnenseitig des Eider-Sperrwerkes untersucht. Dafür ist im Modellgitter die Höhe des Leitdammes auf 0 m NHN gesetzt, sodass

dahinter gelegene ehemalige Wattflächen überflutet werden können. Abbildung 5-9, Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 zeigen die Ergebnisse der Tidekennwertanalyse des Wasserstands.

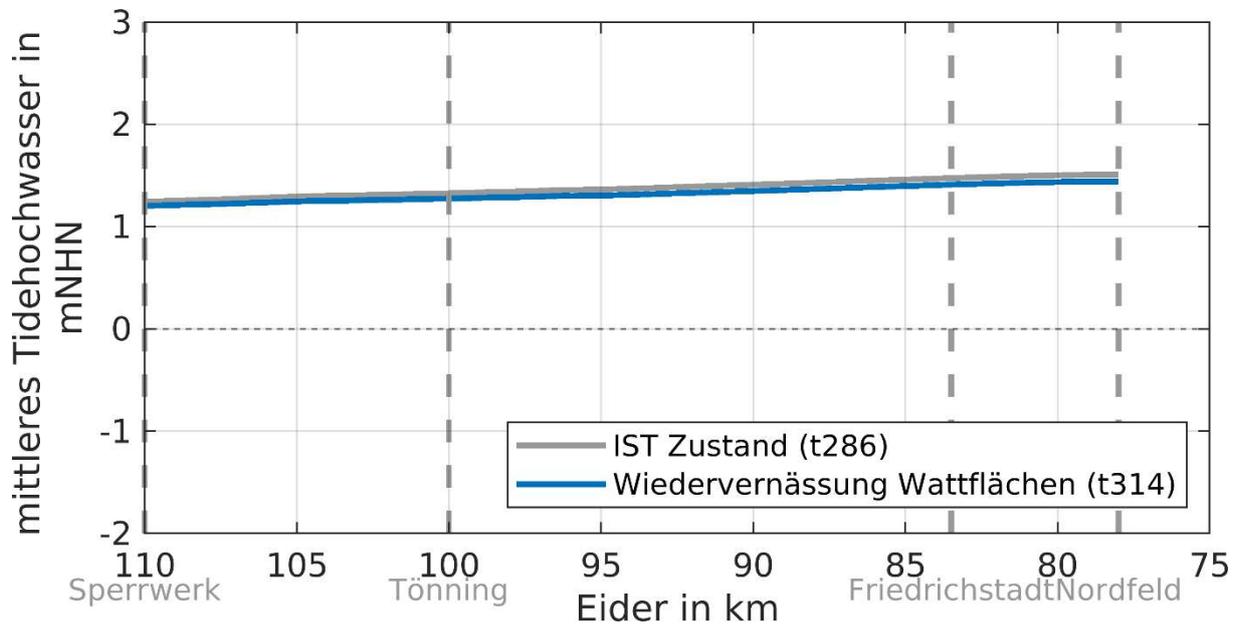


Abbildung 5-9: Optimierungsvariante zusätzlicher Flutraum, mittleres Tidehochwasser

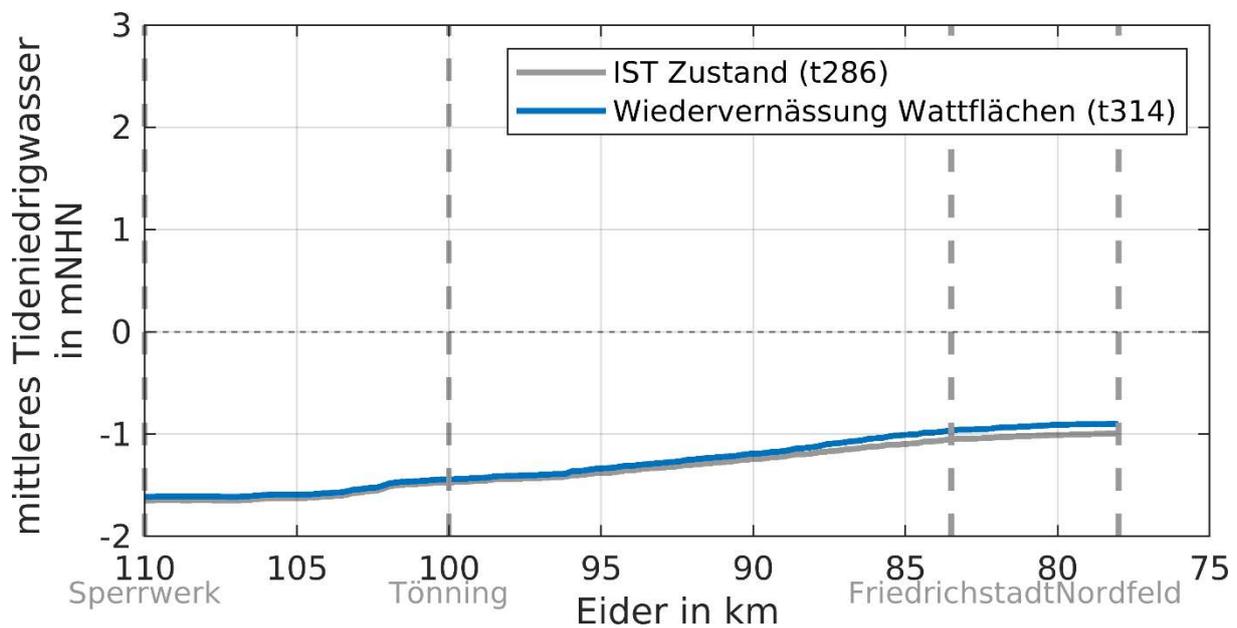


Abbildung 5-10: Optimierungsvariante zusätzlicher Flutraum, mittleres Tideniedrigwasser

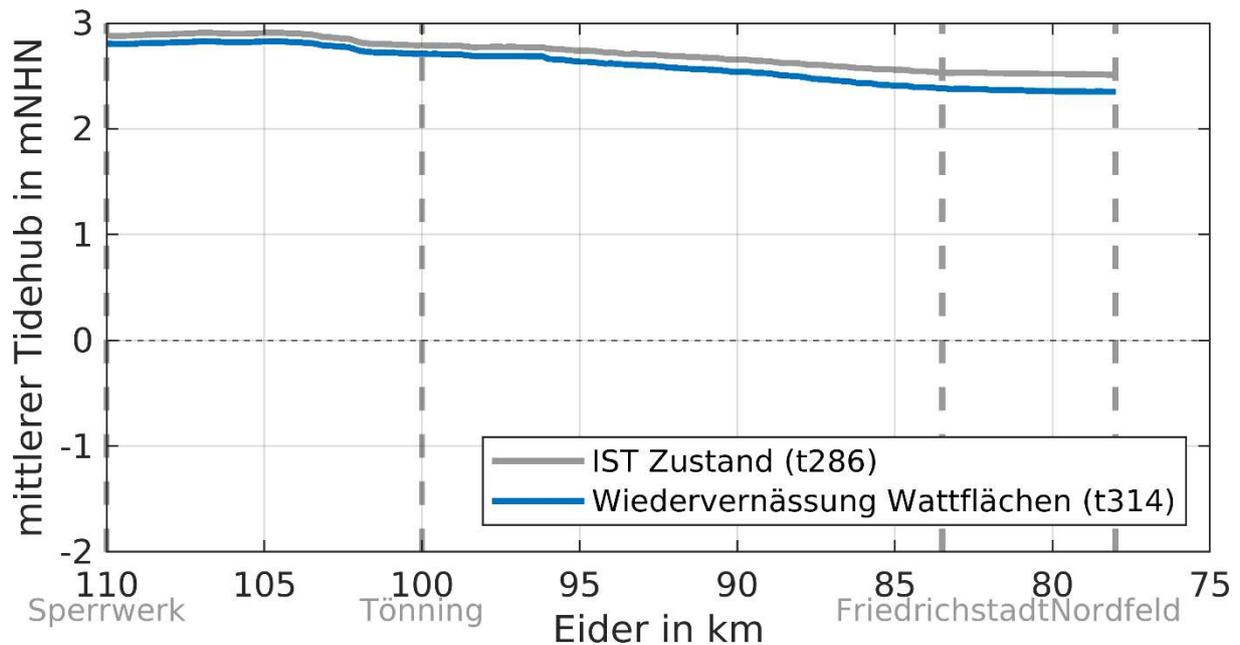


Abbildung 5-11: Optimierungsvariante zusätzlicher Flutraum, mittlerer Tidehub

MThw: Das MThw ist bei der Variante mit zusätzlichem Flutraum niedriger als im Ist-Zustand. Bei Nordfeld ist die Differenz am größten.

MTnw: Das MTnw ist bei der Variante mit zusätzlichem Flutraum höher als im Ist-Zustand. Die Differenz ist bei Nordfeld am größten.

MThb: Der MThb ist bei der Variante mit zusätzlichem Flutraum geringer als im Ist-Zustand. Die Differenz ist bei Nordfeld am größten.

Durch den zusätzlichen Flutraum verringert sich das MThw deutlich. Das MTnw erhöht sich geringfügig. Insgesamt verringert sich der Tidehub.

5.4 Beschreibung und Optimierung zukünftiger Systemzustände

Im Rahmen des Projektes soll abgeschätzt werden, wie der Klimawandel sowie die zukünftigen morphologischen Veränderungen sich auf das System der Außen- und Tideeider auswirken.

5.4.1 Zukünftige hydrologische Szenarien (Klimawandel)

Es erfolgt eine Abstimmung, welche Klimaszenarien sinnvollerweise betrachtet werden sollen, in der um Experten erweiterten Kerngruppe im Januar 2023. Da auch Berechnungsgrundlagen für Neu- und Umbauten, wie des Eider-Sperrwerkes, geschaffen werden sollen, sind extreme Szenarien und langfristige Prognosen zu berücksichtigen. Um die Szenarien

zu berechnen, werden die Oberwasserzuflüsse aus der wasserwirtschaftlichen Analyse der BfG benötigt.

5.4.2 Zukünftige topographische Szenarien (Versandung)

Im Arbeitspaket „zukünftige topographische Szenarien (Versandung)“ sollen morphodynamische Entwicklungstendenzen in der Außen- und Tideeider eingeschätzt werden. Es wurde herausgearbeitet, wie sich die Topographie in der Vergangenheit verändert hat, um ein Systemverständnis der morphodynamischen Entwicklungstendenz zu erzeugen. Dieses wird benötigt, um vorhersagen zu können, wie sich die Topographie zukünftig unter bestimmten Randbedingungen entwickeln wird. Die morphologischen Auswertungen von DGM-Is lieferten bereits erste Tendenzen. Diese Erkenntnisse wurden auf Grundlage historischer Höhenmodelle des LKN.SH überprüft und ergänzt. Der LKN.SH verfügt über umfangreiche Vermessungen in der Außen- und Tideeider. Diese wurden 2020/2021 digitalisiert. Basierend auf der GIS-gestützten Analyse dieser Höhenmodelle wurde herausgearbeitet, wie sich die Topographie der Außen- und Tideeider in der jüngeren Vergangenheit verändert hat und wie sie zukünftig aussehen könnte. Es wurde abgeschätzt, wie sich die morphologischen Veränderungen auf die Vorflutfunktion und den Sedimenthaushalt der Tideeider auswirken. Der Bericht befindet sich momentan in Abstimmung mit dem LKN.SH. Die Ergebnisse werden genutzt, um die Topographie für zukünftige Szenarien festzulegen.

5.5 Bearbeitung weiterer Fragestellungen

Innerhalb des Projekts sollen auch Untersuchungen zu Auswirkungen der Gewässerunterhaltung auf den Hochwasserschutz angestellt werden. Hierfür sind im Bereich der unteren Treene Szenarienrechnungen mit dem 1D-HN-Modell der BfG vorgesehen, mit denen der notwendige Umfang und die Effizienz von Unterhaltungsbaggerungen für den Hochwasserschutz abgeschätzt werden können. 2023 sollen Sedimentproben in der Treene genommen werden, um die Aussagen abzusichern.

Im Bereich der Binneneider sollen Konzepte entwickelt werden, um die Gewässerunterhaltung und den wasserwirtschaftlichen Betrieb zu optimieren. Auch hier sollen die Ergebnisse des 1D-Modells der BfG verwendet werden.

Wenn die Anlagen, insbesondere das Eider-Sperrwerk, anders gesteuert werden sollen als bislang, wird abschließend die Bauwerksbelastung überprüft.

6. Wasserwirtschaftliche Beschreibung und Optimierung des Systems

6.1 Allgemeines

Die wasserwirtschaftliche Beschreibung erfordert eine Betrachtung des gesamten Eider-Treene-Systems und beschränkt sich daher nicht auf die Gewässerläufe, sondern berücksichtigt die zahlreichen Prozesse in der Fläche. Wesentlicher Aspekt ist dabei die Kombination von Prozessen und Veränderungen im Gebiet selbst (Steuerung von Bauwerken, landschaftspflegerische Maßnahmen etc.) mit den Einflüssen, die in Form meteorologischer und klimatischer Faktoren von „außen“ auf das System einwirken. Um auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen sowohl den Ist-Zustand wie auch mögliche zukünftige Situationen untersuchen zu können, werden einerseits ein Wasserhaushaltsmodell (siehe Kapitel 4.4 Hydrologisches Modellframework HydPy) und zusätzlich ein eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell (siehe Kapitel 4.3 Modellsystem SOBEM) aufgebaut. Beide Modelle sind in der Lage, sowohl Einzelereignisse (Tage bis Wochen) wie auch Simulationen auf der klimatischen Zeitskala (Jahrzehnte bis zum Jahrhundert) zu bewerkstelligen. Auch der Einsatz für kurzfristig ausgerichtete Optimierungen im Rahmen operationeller Systeme ist mit beiden Modellwerkzeugen vorgesehen.

6.2 Vorstudien zur Tieflandhydrologie

6.2.1 Vorstudie NOK

Die hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Untersuchungen im Einzugsgebiet des Nord-Ostsee-Kanals erfolgten von September 2019 bis Februar 2021 durch das Büro Bjørnsen Beratende Ingenieure (BCE)⁴ im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Diese Fallstudie NOK dient als Vorstudie für die wasserwirtschaftliche Beschreibung des Eider-Treene-Systems aufgrund der naturräumlichen Ähnlichkeiten (wie Abbildung 6-1 zeigt). Methodische Ansätze der Tieflandhydrologie gelten für beide Untersuchungsgebiete.

⁴ Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells im Stundenzeitschritt für den Nord-Ostsee-Kanal unter Verwendung des Modellframeworks HydPy. BCE im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. September 2019 bis Februar 2021

Ziel des Auftrags „Vorstudie NOK“ war der Aufbau eines (weiteren) Wasserhaushaltsmodells im Stundenzeitschritt für das Einzugsgebiet des Nord-Ostsee-Kanals unter Verwendung des Modellframeworks HydPy. Damit setzte dieser Auftrag auf den Vorauftrag⁵ auf, in dem ein Wasserhaushaltsmodell LARSIM-NOK für dasselbe Gebiet, jedoch unter Verwendung der Modellsoftware LARSIM und im Tageszeitschritt aufgebaut wurde. Mit dem feineren Zeitschritt war es möglich die tieflandspezifischen Wasserhaushaltsprozesse im Einzugsgebiet realitätsnäher abzubilden, was wiederum dazu führte, dass nun belastbarere Tagesmittelwerte als Zufluss für den Nord-Ostsee-Kanal generiert werden können.

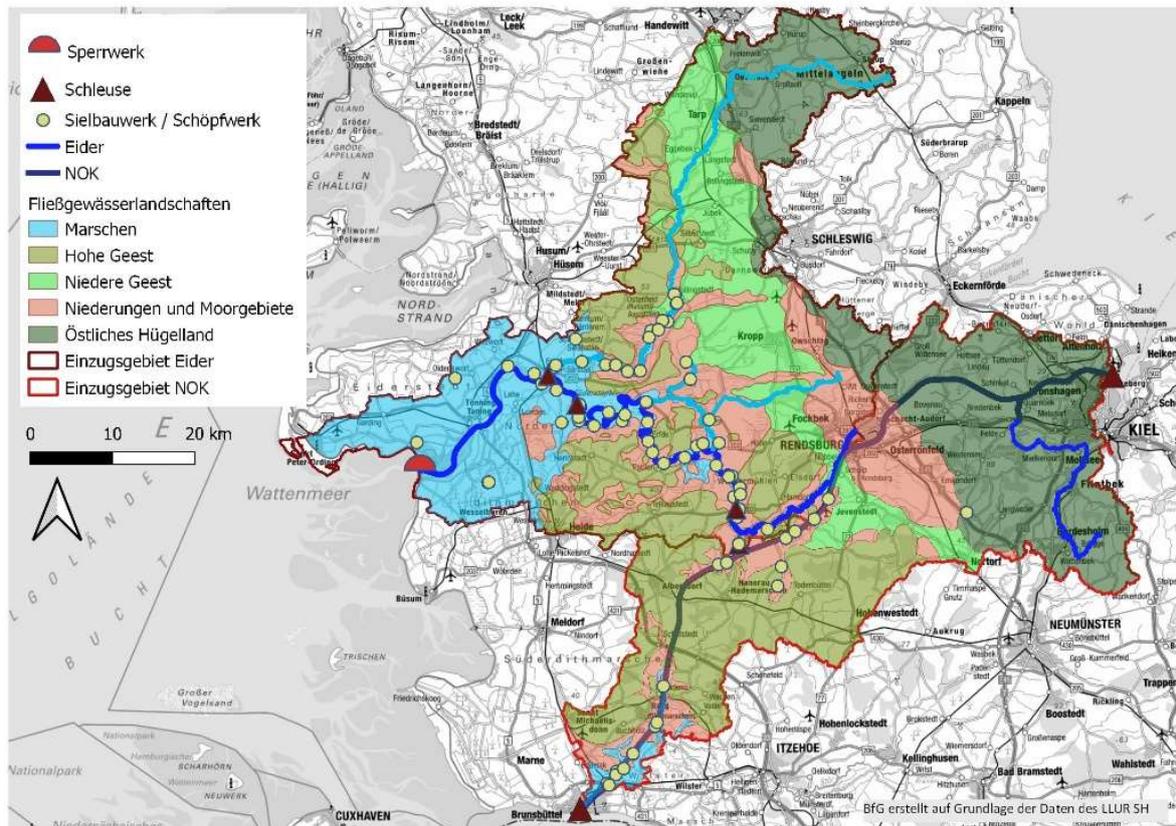


Abbildung 6-1: Gebiet von Eider und NOK mit den Fließgewässerlandschaften (BfG auf Grundlage der Daten vom LfU Schleswig-Holstein, BfG (2021).

Darüber hinaus wurde ein neuer hydrologischer Modellansatz (WALRUS⁶) zur besseren Abbildung der Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser implementiert und auf seine spezifische Eignung geprüft sowie die bereits bestehenden Funktionen im Wasserhaus-

⁵ Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells auf der Basis des Modellsystems LARSIM für den Nord-Ostsee-Kanal im Tageszeitschritt. Aquantec im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Januar bis Dezember 2015

⁶ BRAUER, C. C., TEULING, A. J., TORFS, P. J. J. F. u. R. UIJLENHOET (2014): The Wageningen Lowland Run-off Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments

haltsmodell LARSIM-NOK zur Abbildung der Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser, wie kapillarer Aufstieg und limitierter Basisabfluss, in modifizierter Form erprobt. Die Implementierung des neuen spezifischen Modellansatzes erforderte zudem die Programmierung einer offenen Schnittstelle in HydPy.

Die Vorstudie NOK führte neben der Erhöhung des Prozess- und Systemverständnisses zur Entscheidung, die Modellsoftware bzw. das Modellframework HydPy für die Wasserhaushaltsmodellierung der EIDER (LOS 1, Details 4.4) zu verwenden. Es zeigte sich, dass das Modell HYDPY NOK ein geeignetes Modell zur Abbildung des Wasserhaushalts im Tieflandgebiet ist. Ebenso empfahl sich die zeitliche Auflösung von 1 Stunde für die Modellierung der Prozesse. Weiterhin wurde deutlich, dass es keine weiteren Vorteile durch die modifizierte LARSIM-Funktionalität „limitierter Basisabfluss“ gab. Ein gewisses geringes Potenzial zeigte sich durch die modifizierte LARSIM-Funktionalität „kapillarer Grundwasseraufstieg“ hinsichtlich der Simulation bestimmter Hochwassertypen, führte aber zu Problemen insbesondere in Niedrigwasserperioden. Hauptschwierigkeit bei der Simulation der Niedrigwasserperioden war der im Vergleich zur Beobachtung niedrigere durch das Modell generierte Abfluss. Bei der Interpretation der Modellergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass Messunsicherheiten in extremen Abflussbereichen stets höher sind als auf mittlerem Abflussniveau.

Die Implementierung des neuen Modellansatzes WALRUS, der speziell für (niederländische) Flachlandbereiche mit geringen Grundwasserflurabständen entwickelt wurde, zeigte dessen hohes Potenzial zur Abbildung der Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser über das Bodensättigungsdefizit - eine andere, innovative und vielversprechende Modellphilosophie. Darüber hinaus verfügt WALRUS nur über wenige Modellparameter. Es gibt jedoch auch Nachteile, für die – bei Anwendung dieses Modellansatzes für die Eider – vorab Lösungsansätze gefunden, erprobt und bewertet werden müssen: a) die Anwendung erfolgte bisher primär für kleine Einzugsgebiete, so dass die Prozesse des Abflussverlaufes nicht integriert sind, b) Verdunstungs- und c) Schneemodellierung müssen extern erfolgen.

Die Weiterentwicklung von WALRUS erfolgte parallel im Rahmen der Vorstudie Eider (siehe 4.5 und 6.2.2) sowie im Rahmen der Wasserhaushaltsmodellierung der EIDER (im LOS 2, Details 6.3).

6.2.2 Vorstudie Eider

Die hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Untersuchungen im Einzugsgebiet der Eider erfolgten von Oktober 2019 bis März 2022 durch Deltares im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde⁷.

Die modelltechnische Abbildung des Wasserhaushalts von Tieflandgebieten wie der Eider verlangt aufgrund ihrer Komplexität weit über Standardsoftwarelösungen hinausgehende spezifische Prozessansätze (siehe auch Vorstudie NOK). Diese existieren in der Wissenschaftswelt, wurden jedoch zumeist nur im Rahmen von Forschungsarbeiten für eigene Fragestellungen und für ausgewählte Einzugsgebiete entwickelt und erprobt. Sofern diese Modellansätze jedoch in Publikationen gut dokumentiert und darüber hinaus im besten Fall auch frei verfügbar auf einer Internetseite zur Verfügung gestellt sind, besteht die Möglichkeit, diese auch auf andere Regionen und mit einem anderen hydrologischen Fokus zu übertragen. Es kann jedoch nicht per se davon ausgegangen werden, dass die Übertragbarkeit erfolgreich sein wird. Daher wurde vor der geplanten Wasserhaushaltsmodellierung des gesamten Eider-Einzugsgebietes (Details siehe 6.3) zusätzlich zur Vorstudie NOK, der Weg der Vorstudien Eider beschritten. In diesen wurde erprobt, inwieweit die neuen, spezifischen Modellansätze für die geplante Wasserhaushaltsmodellierung der Eider geeignet sein würden – vollständig für das gesamte Gebiet oder raumspezifisch bezogen auf die Naturräume – und welche Grenzen diese hinsichtlich der Prozessgleichungen, der Schnittstellenkompatibilität und Erweiterbarkeit mit sich bringen. Dabei kam es bei dem Modellierungsansatz darauf an, dass die relevanten hydrologischen Prozesse (Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser, Wasserzufuhr durch die Quergräben in den Hauptsammler (Verbandsgewässer), Wasserabfuhr durch die Verbandsgewässer, Verzögerung der Wasserströme im Gebiet durch Siel, Schöpfwerk und Wehrbetrieb) mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden. Um das Modellinstrumentarium in seiner gesamten Spannweite prüfen zu können, wurden drei Teileinzugsgebiete im Eider-Einzugsgebiet ausgewählt (siehe Abbildung 6-2), die jeweils unterschiedliche wasserwirtschaftliche Gegebenheiten aufwiesen.

1. Das Teileinzugsgebiet Sorgbrück hat eine Fläche von 131 km². Es liegt im östlichen Teil des Sorge-Einzugsgebietes und integriert drei Landschaftsräume: Grundmoränenplatte und lehmige Endmoränen, Niederungen und Urstromtäler sowie Niederungen und weichseleiszeitliche Außensander. Das Gewässernetz im Einzugsgebiet ist im Vergleich relativ naturnah. Es handelt sich um ein freifließendes System.

⁷ Wasserwirtschaftliche Modellierung von drei Teileinzugsgebieten im tide-beeinflussten Tiefland der Eider. Deltares im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Oktober 2019 bis März 2022

2. Das Teileinzugsgebiet Tönning liegt auf der Halbinsel Eiderstedt, hat eine Fläche von 37,36 km² und mündet in die tidebeeinflusste Eider. Das tidebeeinflusste Gebiet befindet sich im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes und umfasst damit den Landschaftsraum „Marschen und Moore im Tideeinflussbereich“. Das Gebiet ist stark geprägt durch ein Grabensystem, bestehend aus Längs- und Quergräben und zahlreichen Wehren, die zur Steuerung der Entwässerung des Gebiets dienen.
3. Das Teileinzugsgebiet Alte Sorge / Steinschleuse (117 km²) ist durchzogen von Längs- und Quergräben. Die Entwässerung des Gebietes erfolgt über die Pumpwerke Steinschleuse in die Eider. Abflusspegel existieren nicht, jedoch sind Wasserstandsdaten verfügbar.

Konkret wurde in der Vorstudie EIDER (ebenso wie in der Fallstudie NOK) das hydrologische Modellkonzept WALRUS erprobt und weiterentwickelt. Für die Abbildung des Gewässernetzes wurde der hydrodynamische Modellansatz SOBEK verwendet.

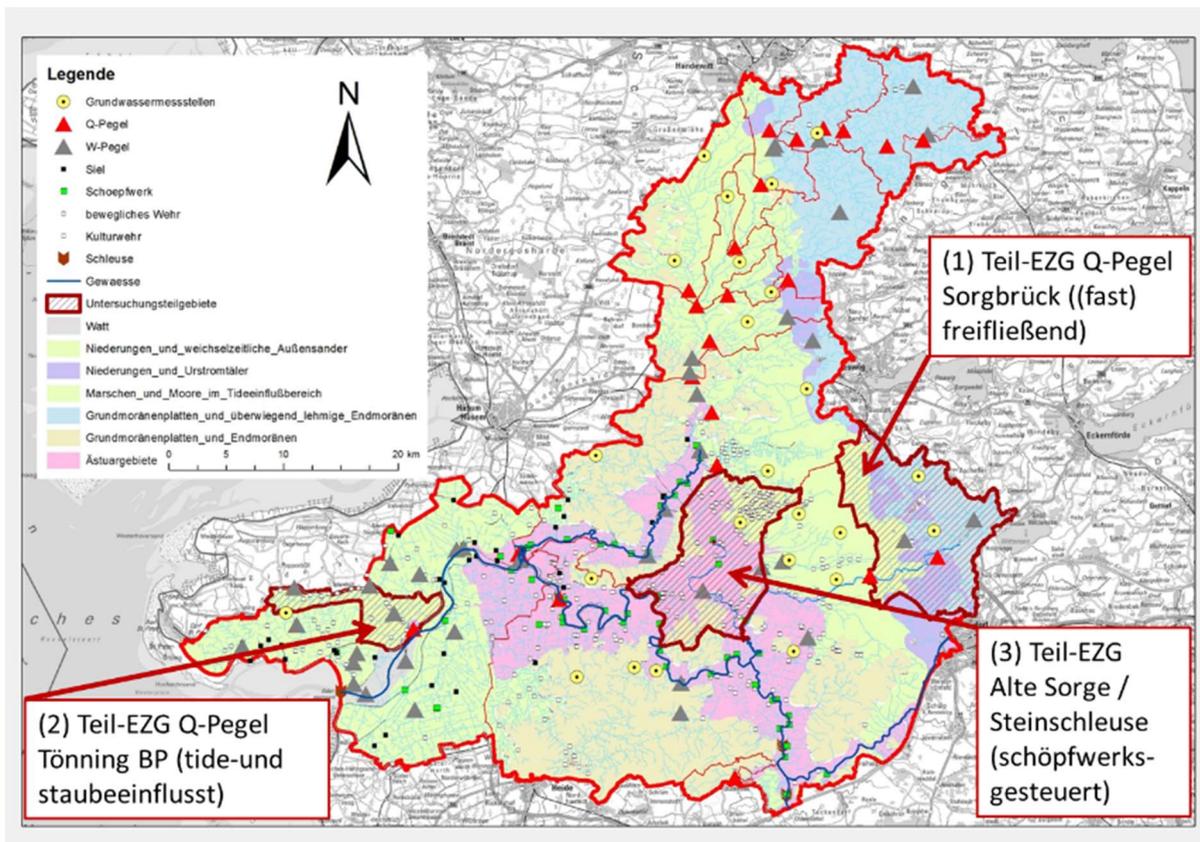


Abbildung 6-2: Im Rahmen der Vorstudie untersuchte Pilotgebiete im Eider-Einzugsgebiet

Die Vorstudie beinhaltete neben der Datenrecherche, -zusammenstellung und -aufbereitung die fachliche Vorbereitung, Durchführung und Begleitung der Vergabe sowie die ad-

ressatenorientierte Aus- und Bewertung sämtlicher Ergebnisse. Das System- und Prozessverständnis für die hydrologischen Tieflandprozesse im Eidergebiet sowie für die Verfügbarkeit und Qualität der erforderlichen Daten wurde dadurch vertieft. Es hatte sich gezeigt, dass der WALRUS-Ansatz Potenzial zeigt, jedoch a) dazu tendiert, in Trockenperioden fälschlicherweise ein Versiegen des Abflusses zu simulieren und b) einen dynamisch reagierenden Basisabfluss erforderlich macht. Weitere Studien sind erforderlich, die sich mit der Weiterentwicklung des WALRUS-Modellansatzes beschäftigen (wie LOS 2 der Wasserhaushaltsmodellierung der Eider 6.3, Projektantrag EIDER-Kult 6.2.4.1 sowie die Bachelor- und Praktikumsarbeiten zur Norderbootfahrt 6.2.3, aber auch weiterhin den Fragen nachgehend, a) ab welcher räumlichen Skala es möglich / sinnvoll ist, das Grabensystem nicht hydronumerisch, sondern über hydrologische Modellansätze zu beschreiben und b) wie die wechselseitige Kopplung von Wasserhaushalt, Einzugsgebiet und Hydraulik des Gewässernetzes am besten erfolgen kann. Diesen beiden Fragen wird ebenso verstärkt im LOS 2 zur Wasserhaushaltsmodellierung der Eider nachgegangen.

6.2.3 Vertiefte Vorstudien Norderbootfahrt

6.2.3.1 Sensitivitätsanalysen zum Wasserhaushalt und -bewirtschaftung

Die vertiefte Vorstudie (1) zur Norderbootfahrt – einem kleinen Einzugsgebiet in der Marschlandschaft von Schleswig-Holstein – umfasste modellbasierte Sensitivitätsanalysen zum Wasserhaushalt und zur Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Norderbootfahrt und setzte auf dem Modellinstrumentarium⁸ auf, das von Deltares im Rahmen der Vorstudie zur Eider (6.2.2) für dieses Gebiet entwickelt wurde. Die Arbeiten wurden durchgeführt von Frau Carola Doeckel⁹ im Zuge ihrer Bachelorarbeit. Die Vorarbeiten erfolgten von Anfang Oktober 2021 bis Anfang Dezember 2021, die offizielle Bearbeitung setzte nahtlos an bis Anfang März 2022.

Im Zuge der Sensitivitätsuntersuchungen wurden die Parameter Bodenart (in WALRUS) und Gerinnerauigkeit (in SOBEK) verändert und die Auswirkungen auf die Abfluss- und Wasserstandsentwicklung am Binnenpegel Tönning untersucht. Beide Parameter spielen bei der Abflussdynamik eine entscheidende Rolle, sind aber auch in der Realität sehr heterogen und daher im Modell schwierig abzubilden. Als Referenzzeitraum, in dem die Läufe mit veränderter Parametereinstellung mit dem Lauf der Ausgangseinstellung verglichen wurden, diente der März 2016 aufgrund der hohen Modellgüte. Die Bewertung der Sensi-

⁸ SOBEK-Rural/WALRUS-EPW

⁹ Bachelorstudium der Geographie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn

tivität erfolgte anhand von Wasserstands- und Abflussganglinien, Diagrammen der Differenz des Abflusses und Wasserstandes zum Referenzlauf, Scatterplots sowie dem χ^2 -Anpassungstest. Im Ergebnis der Arbeit lässt sich zusammenfassen, dass Abfluss und Wasserstand sowohl auf Änderungen der Bodenart als auch der Gerinnereauigkeit reagieren und die Richtung der Abweichung vom Referenzlauf für die jeweiligen Szenarien nachvollziehbar ist. Für den hier betrachteten Referenzzeitraum und im Ergebnis der Analysen wurde festgestellt, dass der Parameter Gerinnereauigkeit als sensitiver im Vergleich zum Parameter Bodenart bewertet wird. Inwieweit dieses Ergebnis generalisierbar und auch auf andere Gebiete übertragbar ist, muss im Detail noch weiter, ggf. auch mit einem detaillierteren Auswertungsansatz untersucht werden. Um die Behebung dieses Wissensdefizits etwas zu erleichtern, gleichzeitig aber auch um das Verständnis für die Prozessgleichungen in WALRUS zu erhöhen, wurde die detaillierte Vorstudie (2) zur Norderbootfahrt initiiert.

6.2.3.2 Excel-basierter Prototyp zur automatisierten Simulation des Gebietswasserhaushaltes

Der Excel-basierte Prototyp wurde entwickelt auf der Grundlage der Prozessgleichungen von WALRUS (siehe Kapitel 4.5) und dient zur automatisierten Simulation des Gebietswasserwasserhaushaltes (am Beispiel der Norderbootfahrt, 6.2.3.1). Ziel war es, a) die relevanten wasserhaushaltlichen und wasserwirtschaftlichen Prozesse im Gebiet leicht verständlich für Dritte nachvollziehbar abzubilden und b) automatische Verknüpfungen zwischen den Parametern und Zustandsgrößen herzustellen, damit im Falle weiterer Szenarierechnungen automatisiert eine Aktualisierung erfolgen kann. Diese Arbeiten wurden durchgeführt von Herrn Philipp Reicharts¹⁰ im Rahmen eines Praktikums im Masterstudienang im September / Oktober 2022 an der Bundesanstalt für Gewässerkunde.

6.2.4 Forschungsanträge

6.2.4.1 F+E „EiderKult“

Der BfG bietet sich über das Bundesministerium für Digitales und Verkehr die Möglichkeit Ressortforschung zu einem Thema über einen Zeitraum von mehreren Jahren zu betreiben. Dies erfolgte mit dem Ziel, die Beratungsleistung der BfG stets auf hohem Niveau entsprechend des Standes der Technik und der Wissenschaft zu gewährleisten. Grundvorausset-

¹⁰ Masterstudium Geographie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn

zung für die Zuschlagserteilung ist das erfolgreiche Durchlaufen / Bestehen eines standardisierten zweistufigen Evaluierungsverfahrens mit Stufe 1 – Einreichung einer Projektskizze und bei positiver Bewertung Stufe 2 – vollständiger Projektantrag.

Die Vorstudien NOK und EIDER (6.2.1 und 6.2.2) haben gezeigt, wie viele offene Fragen die Wasserhaushaltsmodellierung der Eider mit sich bringt und, dass es fast nicht möglich ist, diese Fragen belastbar mit den verfügbaren Ressourcen zu beantworten. Da die Beantwortung jedoch essentiell für eine sehr gute, qualitativ hochwertige Beratungsleistung der BfG ist, wurde EIDER-Kult „Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft im Eider-Einzugsgebiet – einer küstennahen Kulturlandschaft“ ins Leben gerufen, speziell um die Prozesse von Wasser- und Stoffhaushalt sowie Bodenentwicklung / Bodenbewegung besser verstehen zu können.

In Zuge der Stufe 1 wurde positiv bewertet, so dass der vollständige Projektantrag zum Ende September 2021 eingereicht wurde. Im Januar 2022 wurde der Projektantrag abgelehnt.

6.2.4.2 F+E „NordLicht“

Die offenen Fragen zur Wasserhaushalts- und Wasserbewirtschaftungsmodellierung der Eider konnten über den Projektantrag „Eider-Kult“ nicht untersucht werden, so dass mit Einreichung von „NordLicht: Wasserbewirtschaftung von Kultur- und Naturlandschaften im Küstenraum von Nord- und Ostsee im Sinne der Generationenverantwortung“ ein neuer Anlauf (im Zuge eines weiteren Calls) unternommen wurde. Einige Ideen von Eider-Kult sind in NordLicht aufgegangen, womit die Hinweise, die schlussendlich zur Ablehnung des vollständigen Projektantrages von EiderKult führten, automatisch berücksichtigt wurden.

Schwerpunkt ist nach wie vor die Modellierung des Wasserhaushalts und der Wasserbewirtschaftung in anthropogen geprägten Tieflandregionen. Die Projektskizze von „NordLicht“ wurde am 30.10.2022 eingereicht. Die Evaluierung erfolgt gegenwärtig. Ein Ergebnis wird bis zum 2. Quartal 2023 erwartet.

6.3 Beschreibung des Ist-Zustandes der Wasserbewirtschaftung

6.3.1 Einzugsgebiet

Die Komplexität der Wasserhaushalts- und Wasserbewirtschaftungsmodellierung für das gesamte Einzugsgebiet der Eider wurde ausführlich im Abschnitt Vorstudien vorgestellt, ebenso wurden die Lösungsansätze aufgezeigt.

Es gibt für die Fragestellung und für die Gebietscharakteristik und -größe kein standardisiertes hydrologisches Modellwerkzeug, auf das zurückgegriffen werden kann. Vielmehr müssen innovative Modellansätze gefunden, erprobt und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet bzw. weiterentwickelt werden. Diese Forderung ist leichter geschrieben als umgesetzt, denn Grundvoraussetzung hierfür ist, dass die Probleme bei Einsatz hydrologischer Standardanwendungen entdeckt und verstanden werden müssen, was wiederum nur möglich ist, wenn ein detailliertes System- und Prozessverständnis auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen vorhanden ist. Dieses wurde mittels Vorstudien generiert über einen mehrjährigen Zeitraum von Dezember 2018¹¹ bis Oktober 2022. Ab März 2021 konnte mit der Leistungsbeschreibung für die Wasserhaushaltsmodellierung der Eider begonnen werden. Die Zuschlagserteilung an BCE erfolgte ein gutes Jahr später und das Projekt begann im Mai 2022.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Vorstudien gezeigt haben, dass die Wasserhaushaltsmodellierung im Eider-Gebiet, welches durch Landsenkungen, partiell auch Landhebungen, der Niederungsgebiete durch die extensive Grünlandbewirtschaftung und die andauernde Hebung des skandinavischen Schildes betroffen ist, vor folgender Problematik steht, für die im Rahmen des Projektes Lösungen gefunden werden müssen:

- Wasserstands- und Abflussdaten bzw. Pumpwassermengen liegen nur spärlich vor und sind aufgrund der bisher nicht ausreichend quantifizierten Landsenkung auch nur bedingt verwendbar
- Fließvorgänge im verzweigten gefällearmen Grabensystem erfolgen nur durch wasserstandsgesteuerten Pump- und Sielbetrieb, deren Aufzeichnungen nur für die jüngere Vergangenheit vorliegen
- Freifließende Teilgebiete finden sich in den Kopfeinzugsgebieten der Eider sowie der Treene
- Unterirdische Zuflüsse von den höheren zu den tiefergelegenen Gebietsanteilen sind zu berücksichtigen
- Bodenmechanische Prozesse, wie Setzungen, beeinflussen die Bodenwasserhaushaltsdynamik kontinuierlich
- Die direkte Kopplung zwischen dem Grabensystem und der zu entwässernden Fläche ebenso wie zwischen den Hauptgewässern Eider, Treene und Sorge und den angrenzenden Landflächen ist noch nicht oder nur unzureichend abgebildet.

¹¹ Beginn der Erstellung der Vergabeunterlagen für die Vorstudie NOK

Dementsprechend wurden zwei Detailaufgaben (in 2 Losen) vergeben.

1. LOS 1: Aufbau des Wasserhaushaltsmodells HydPy-L-EIDER für das gesamte Eider-Einzugsgebiet unter Verwendung des Modellframeworks HydPy

LOS 1 deckt den Entwicklungsteil ab, also die Erstellung und Kalibrierung/Validierung des Wasserhaushaltsmodells HydPy-L-EIDER. Die mit HydPy-L-EIDER simulierten Abflüsse sind die Randbedingungen für die hydrodynamischen Modelle (1D-HN-SOBEK-EIDER, 2D-SOBEK).

2. LOS 2: Sensitivitätsanalysen und Weiterentwicklung des Modells SOBEK-WALRUS-AlteSorge.

LOS 2 fokussiert auf in den Vorstudien NOK und EIDER formulierten Forschungsfragen, denen über Szenarienrechnungen und Modell-Anpassungen im Teil-Einzugsgebiet der Steinschleuse/Alte Sorge nachgegangen werden soll.

1. Wie sind die Parameter im vorliegenden modelltechnischen Ansatz SOBEK-WALRUS-AlteSorge anzupassen, um die dominanten Wasserflüsse (Oberflächen- und Grundwasserinteraktion, Grundwasserzustrom), einem Grabensystem mit Pump- und Sielbetrieb (Tide- und Windeinfluss) auf unterschiedlichen Skalen adäquat simulieren zu können? Ausgehend von einem bestehenden hohen Abstrahierungsgrad bei der Abbildung der Gewässerstruktur ist mit ihrer schrittweisen Veränderung (Reduzierung und Erhöhung) das Modellinstrumentarium jeweils erneut anzuwenden und die simulierten Abflusskomponenten sind zu vergleichen.
2. Zu untersuchen ist die Frage, inwieweit eignet sich das bestehende Konzept SOBEK-WALRUS-AlteSorge (Limitierung: Ein-Wege-Kopplung) und / oder welche Erweiterungen (ggf. zwei-Wege-Kopplung) sind notwendig, um entsprechende Modellverbesserung hinsichtlich der oben genannten Wasserflüsse abbilden zu können?
3. Eine weitere Frage ist, inwieweit kann im oben genannten Kontext die hydro-numerische Modellierung alternativ durch einen hydrologischen Modellbaustein ersetzt werden? Bis zu welchem Detaillierungsgrad des Grabensystems (Verbandsgewässer, Quergräben) ist eine hydrologische Modellierung vorteilhaft?
4. Welche Strategien für Kalibrierung und Regionalisierung, speziell der Wasserhaushaltsmodellierung mit WALRUS, sind unter der gegebenen Datensituation geeignet?

Seit Projektbeginn im Mai 2019 erfolgte eine detaillierte Datenaufbereitung/-prüfung:

- Teilgebiete und Fließgewässer mit Anpassung der Gebietskennziffern und Gebietsabgrenzung aufgrund von Schöpfwerksgebieten, lateralen Zuflüssen, Bauwerken (Schöpfwerke, Deiche, Brücke, Siele, Schleusen) und Pegeln.
- Überprüfung und Bewertung hinsichtlich des Einsatzgebietes von drei verschiedenen Bodenkarten (BK25, ein Entwurf der BK50 und die BÜK250 für Schleswig-Holstein)
- Zuschnitt auf das Modellgebiet der ALKIS Landnutzungsdaten mit 25 verschiedenen Landnutzungsklassen
- Parametrisierung von Gräben, Schöpfwerken (Anzahl 60), Schleusen, Siele und Poldern

Die räumliche Struktur des Modells HydPy-L-Eider-Modells ist abgeleitet. Die Vernetzung der 538 Teilgebiete erfolgt aufgrund der vergebenen Gebietskennzahl nach LAWA-Richtlinie. Die meteorologischen Eingangsdaten (Niederschlag, Lufttemperatur, relative Feuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und Luftdruck) wurden von der BfG entsprechend der räumlichen Modellstruktur erstellt, so dass im ersten Halbjahr 2023 mit der Kalibrierung / Validierung begonnen werden kann.

Die Sensitivitätsuntersuchungen für die Alte Sorge erfordern eine softwaremäßige Modelanpassung in der Art, dass die Wasserhaushaltsmodellierung (WHM-Modell) (WALRUS-Konzept) von der hydrodynamischen Modellierung (HN-Modell) (SOBEK-Konzept) getrennt wird, und dies unter der Berücksichtigung, dass die simulierte Hydrologie als externe Randbedingung und lateraler Zufluss für die hydrodynamische Modellierung fungiert. Diese Arbeiten erfolgen zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichtes, ebenso wie die Durchführung der Sensitivitätsuntersuchungen. Mit einem Abschluss dieser Arbeiten wird im 1. Halbjahr 2023 gerechnet.

6.3.2 Gewässersystem Eider-Treene-Sorge

Zur Beschreibung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems wird neben dem Wasserhaushaltsmodell ein eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell (1D-HN-Modell) auf Basis des Modellsystems SOBEK (siehe Kapitel 4.3 Modellsystem SOBEK) aufgebaut. Eindimensionale Gerinnehydraulik bedeutet, dass die in Realität dreidimensional ablaufenden Strömungsprozesse auf eine Dimension – die Hauptfließrichtung – reduziert werden. Geschwindigkeits- sowie Beschleunigungskomponenten senkrecht zur Flusslängs-

achse werden somit vernachlässigt. Im Gegensatz zu zwei- oder dreidimensionalen Modellen (siehe Kapitel 3D-HN-Modell der Außen- und Tideeider) wird die Topographie in Form von Querprofilen, welche in definierten Abständen entlang der Gewässerachse angeordnet sind, abgebildet. Wichtig hierbei ist es, durch die Lage der Querprofile relevante Strukturen im und am Gewässer (z.B. Verengungen, Sohlsprünge etc.) zu erfassen. Die Ergebnisse eines 1D-HN-Modells sind stets als querschnittsgemittelte Größen zu interpretieren. Um auch unterschiedliche Fließwege an einem Gewässerabschnitt oder bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen mit den Möglichkeiten eines 1D-Modells annähernd nachzubilden, erfolgt vielfach eine Verzweigung der Fließstränge, so dass beispielsweise bei Hochwasser auch im Modell ein Teil des Abflusses über das eigentliche Gewässerbett und ein weiterer Anteil über das Vorland abgeführt werden kann.

Das 1D-HN-Modell zur Beschreibung des Ist-Zustands erstreckt sich über die rund 110 km der Binnen- und Tideeider zwischen Rendsburg und dem Eider-Sperrwerk. Zusätzlich werden der rund 50 km lange Abschnitt der Treene unterhalb des Pegels Eggebek sowie Bereiche der Neuen Sorge (unterhalb des Pegels Sorgbrück) und Alten Sorge (etwa ab Schöpfwerk Börmerkoog) als Modellstränge berücksichtigt, so dass die Gesamtmodellstrecke rund 220 km umfasst. Abbildung 6-3 stellt die Struktur des 1D-HN-Modell in schematischer Form dar. Neben der räumlichen Ausdehnung des Modells sind dort auch relevante Modellelemente (insbesondere Bauwerke, Pegel, Modellzuflüsse) gekennzeichnet. Zudem geben Farbgebung bzw. Symbolik entlang der Modellstränge Aufschluss über die vorrangig verwendeten topografischen Grundlagendaten für den Modellaufbau (DGM-W, vermessene Gewässerprofile, vermessene Gewässerprofile mit Vorlandanschluss). Das 1D-HN-Modell vereint Gewässer unterschiedlichster Gestalt und hydraulischer Charakteristik: vom breiten Tideästuar bis zum stark mäandrierenden, durch ausgeprägten sommerlichen Bewuchs gekennzeichneten Tieflandfluss Treene.

Das 1D-HN-Modell soll einerseits im Sinne von Szenarienbetrachtungen zur (großräumigen) Untersuchung und Analyse von Maßnahmen im / am Gewässer sowie andererseits als operationelles Werkzeug innerhalb eines von der BfG zu erstellenden Vorhersagesystems (siehe Kapitel 6.5 Operationelle Optimierung der Wasserbewirtschaftung und des Hochwassermanagements) für das Eider-Treene-Gebiet im gesamten Abfluss- bzw. Wasserstandsspektrum eingesetzt werden können. Somit ist zum einen Flexibilität im Bereich der Steuerung der zentralen Bauwerke (Eider-Sperrwerk, Anlage Nordfeld, Schleusen in Friedrichstadt etc.) gefordert, um sowohl eine regelbasierte wie auch eine manuelle Steuerung (z.B. über Sperrwerkszeitreihen) zu realisieren. Zum anderen sind im Bereich der Treene ausgewählte Maßnahmenvarianten innerhalb der Modelltopographie (Deichhöhen / -verläufe, Polder etc.) vorzusehen, um somit in Kombination mit Steuerungsvarianten Szenarien

rienuntersuchungen vornehmen zu können. Nicht zuletzt ist die Berechnungsgeschwindigkeit des Modellsystems ein wichtiger Faktor, den es mit Blick auf einen operationellen Einsatz zu berücksichtigen gilt.

Das 1D-HN-Modell befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung des Zwischenberichts in der Aufbauphase, so dass noch keine Ergebnisse vorliegen. Die nachfolgenden Absätze geben einen Einblick in die Modellstruktur und den Modellaufbau.

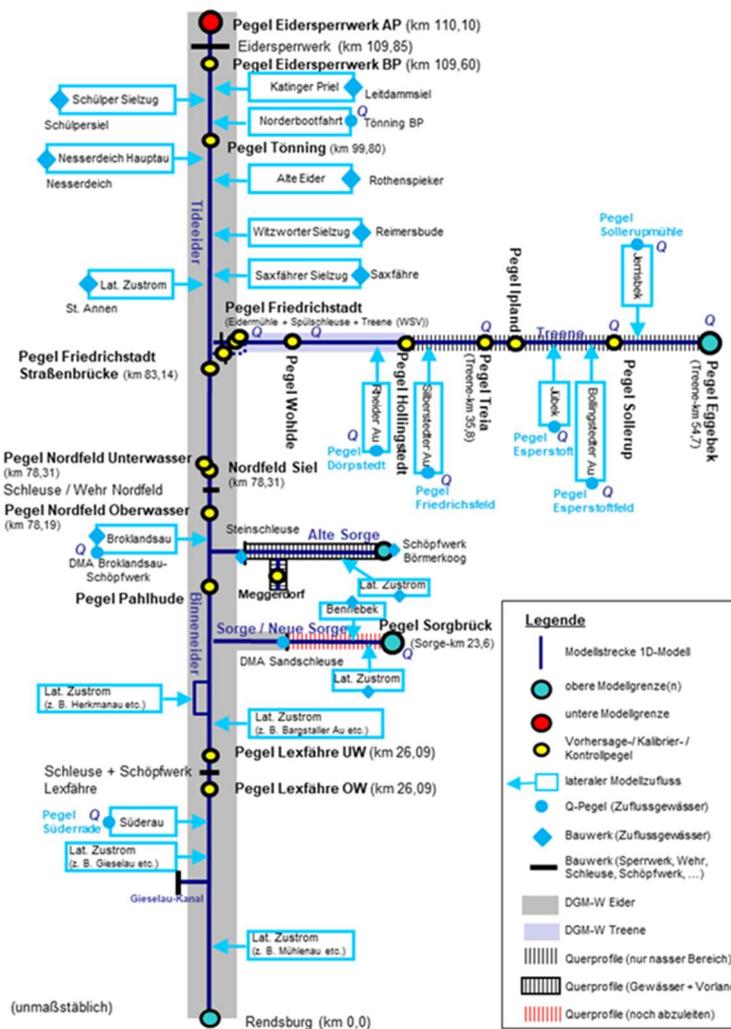


Abbildung 6-3: System-Skizze des 1D-HN-Modells für das Eider-Treene-Gebiet

Die Topographie der vom 1D-HN-Modell erfassten Gewässerstrecken wird in Form von Querprofilen abgebildet. Um dabei mit den Möglichkeiten eines 1D-Modells auch unterschiedliche Strömungsbereiche innerhalb eines Querprofils berücksichtigen zu können,

werden die Profile in drei unterschiedliche Fließzonen gegliedert: Hauptgerinne, Ufer(bereich) und Vorland. Zumeist besitzen diese Bereiche unterschiedliche Strukturen und Fließwiderstände, dem im Modell durch unterschiedliche Rauheiten Rechnung getragen werden kann. Abbildung 6-4 zeigt einen Ausschnitt aus den Geodaten des 1D-Modells im Bereich der Treene-Mündung bei Friedrichstadt. Die Fließzonen sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Zusätzlich sind die Gewässerachsen und die Lage der Querprofile (die sog. Querprofilspuren) abgebildet.

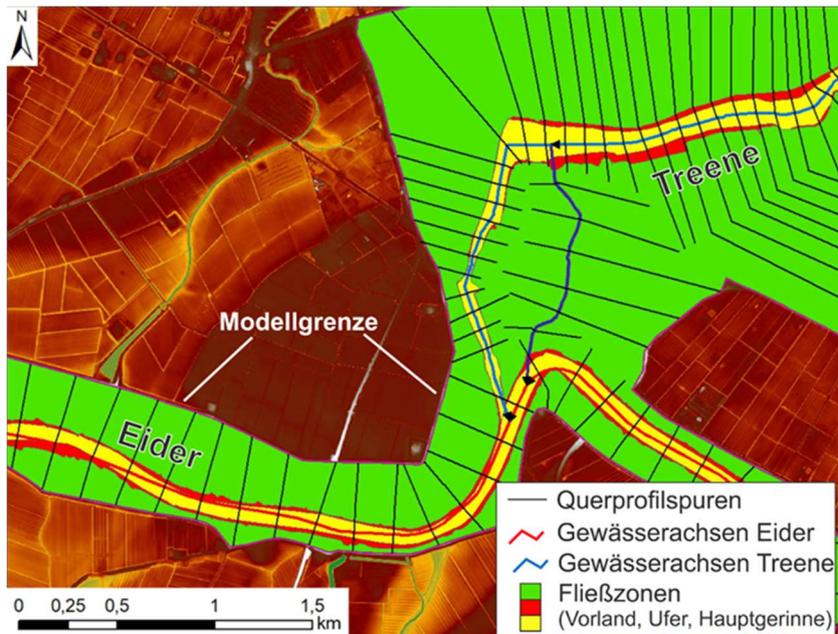


Abbildung 6-4: Festlegung von Querprofilspuren und Fließzonen im 1D-HN-Modell der Eider (Quelle Hydrotec)

Im Stadtbereich von Friedrichstadt ist in Abbildung 6-4 auch eine Fließverzweigung zu erkennen, um den Oster- und Westersielzug explizit im Modell zu berücksichtigen. Dabei fällt die Modellstruktur mit unterschiedlichen Fließsträngen an einigen Stellen im 1D-HN-Modell noch wesentlich komplexer aus, wie Abbildung 6-5 verdeutlicht. Dargestellt ist hier der Treeneabschnitt zwischen Wohlde und Schwabstedt mit den verzweigten Gewässersträngen (blau) sowie den festgelegten Querprofilen (schwarz).

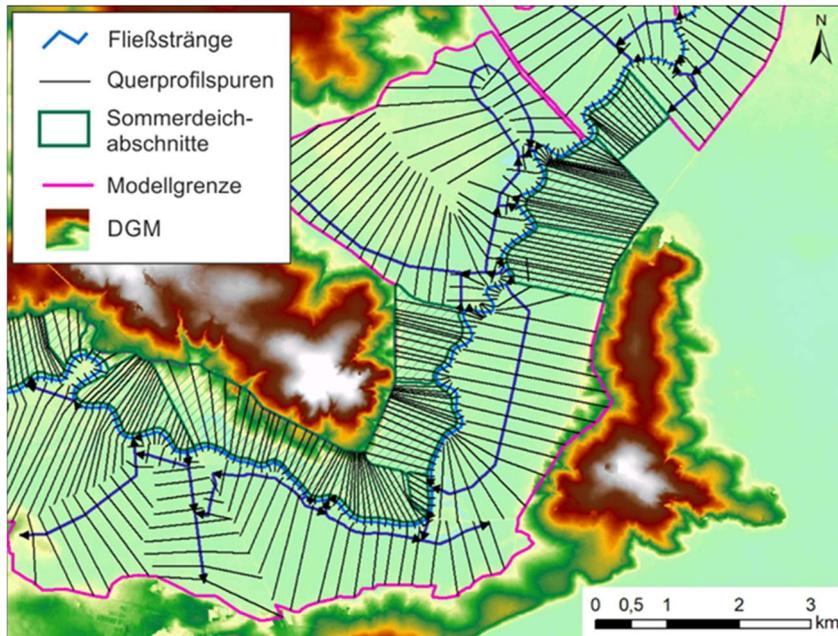


Abbildung 6-5: Berücksichtigung verzweigter Fließwege und Sommerdeiche im 1D-HN-Modell (Quelle Hydrotec)

Das 1D-HN-Modell wird an seinen Rändern sowie an weiteren lateralen Zuläufen durch Abflüsse angetrieben. Am unteren Modellrand, dem Außenpegel des Eider-Sperrwerks, werden die Wasserstände der Nordsee an das Modell übergeben (s. Abbildung 6-6). Als zusätzliche Größe, die auf das Modell „von außen“ einwirkt, findet der Wind explizit Berücksichtigung. Auch wenn der Windeinfluss bereits in den Nordsee-Wasserständen enthalten ist, besitzt der Wind weiteren Einfluss auf die Wasserstände im Modellgebiet. So wirkt sich der Windstau beispielsweise entlang der unteren Treene bei entsprechender Westwindlage mit hohen Windgeschwindigkeiten aus. Im 1D-Modell ist die vereinfachte Berücksichtigung von Windeffekten auf die Strömungsvorgänge möglich. Dabei ist eine repräsentative Station zu wählen, für die die Daten zu Windgeschwindigkeit und Windrichtung vorliegen. Auf der Grundlage vergleichender Analysen mehrerer DWD- und WSV-Stationen, die Winddaten in Echtzeit liefern, ist die Wahl auf die DWD-Station St. Peter-Ording gefallen. Diese liegt zwar außerhalb dieses Modellgebiets, ist dennoch als repräsentativ zu bezeichnen und weist eine hohe Datenverfügbarkeit auf.

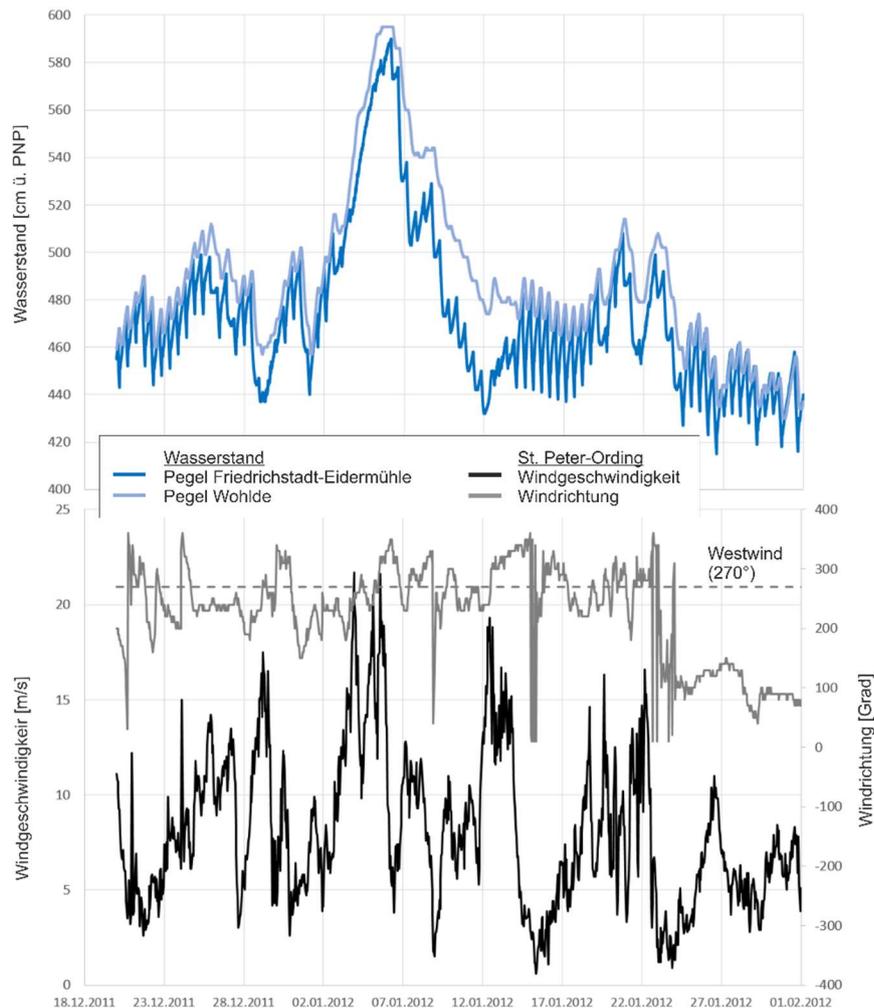


Abbildung 6-6: Vergleichende Darstellung der Wasserstände an der unteren Treene sowie der Windverhältnisse während des Hochwassers 2012

Abbildung 6-6 stellt beispielhaft für das Hochwasserereignis 2012 an der Treene die Wasserstände der Pegel Friedrichstadt-Eidermühle und Wohldede den Windverhältnissen an der Station St. Peter-Ording gegenüber. Erkennbar wird, dass die Wasserstände in Wohldede zumeist deutlich über den Wasserständen in Friedrichstadt liegen, insbesondere dann, wenn auch hohe Windgeschwindigkeiten aus westlicher Richtung gemessen wurden. Zu bedenken ist jedoch, dass nicht ausschließlich der Wind Einfluss auf den Wasserspiegel an der unteren Treene hat, sondern auch weitere Effekte, insbesondere die Entwässerung in die Eider, diesen zusätzlich beeinflussen. Dennoch besteht durch die Berücksichtigung der Windverhältnisse im 1D-HN-Modell die Möglichkeit, den Einfluss des Windes auf die Wasserstände für unterschiedliche Verhältnisse fundiert zu quantifizieren.

6.4 Identifizierung von Optimierungspotentialen zum Hochwasserschutz

Die Möglichkeiten weiterer Maßnahmen zur Minderung der schadenbringenden Wirkung von Hochwassern soll mit Hilfe der aktuell erstellten Modellinstrumentarien systematisch untersucht werden. Der Fokus liegt dabei auf dem Bereich der unteren Treene sowie dem Zusammenspiel mit der Entwässerung von Tide- und Binneneider. Für diese Untersuchungen soll das 1D-HN-Modell eingesetzt werden. Aus diesem Grund wurden bereits im Zuge des Aufbaus des 1D-Modells für den Ist-Zustand (siehe Kapitel 6.3 Beschreibung des Ist-Zustandes der Wasserbewirtschaftung) mögliche Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes an der unteren Treene berücksichtigt. Abbildung 6-7 zeigt die System-Skizze des 1D-Modells für den Ausschnitt der Treene mit den aktuell bestehenden drei Poldern (Polder Schwabstedter Westerkoog, Polder Stapel und Polder Winnert) innerhalb des bedachten Abschnitts der Treene unterhalb von Treia. Modellgestützt untersucht werden sollen wasserstandsenkende Maßnahmen im / am Gewässer (modifizierte / zusätzliche Polder, Deichrückverlegungen, Sohlräumung), die Anpassung von Deichhöhen sowie die modifizierte Steuerung des Eider-Sperrwerks in Kombination mit den Anlagen Nordfeld und Friedrichstadt.

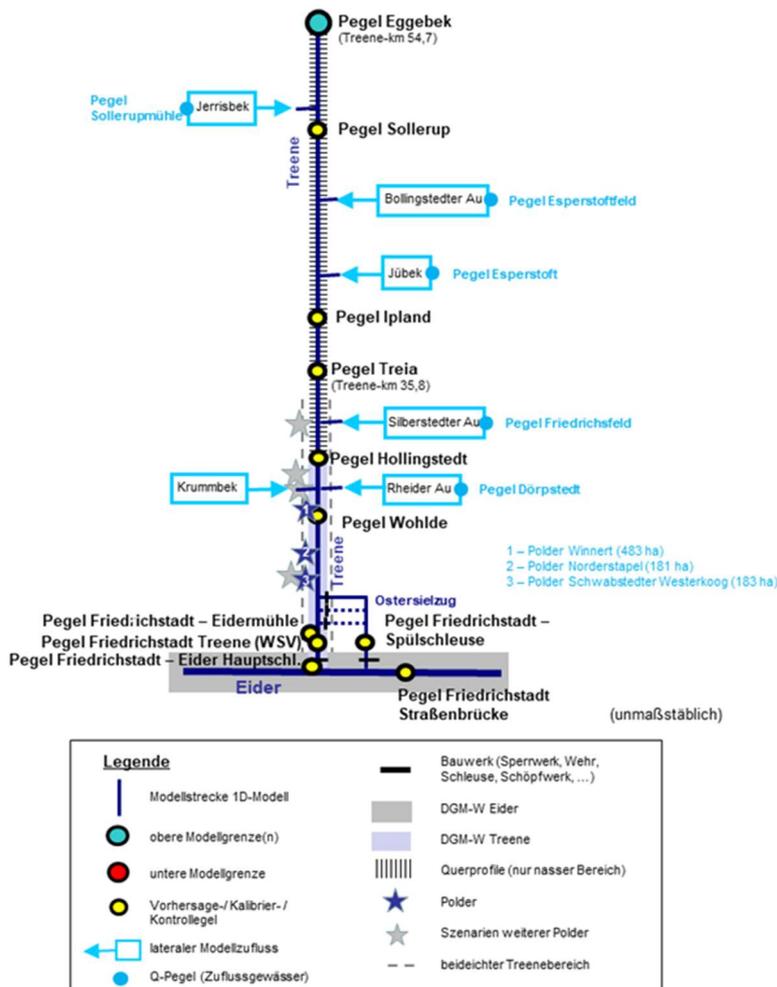


Abbildung 6-7: System-Skizze des SOBEK-Modells: Ausschnitt Treene

Am 19. September 2022 fand ein Workshop mit Vertretern des Landes (LKN.SH, LfU, MEKUN), der betroffenen Landkreise Nordfriesland und Schleswig-Flensburg, des Eider-Treene-Verbands sowie des Bundes (GDWS, WSA Elbe-Nordsee, BAW, BfG) statt, in dem detailliert die zu untersuchenden Maßnahmen an der unteren Treene diskutiert und spezifiziert wurden. Auf dieser Grundlage wurden jede Maßnahme und ihre Abbildung im 1D-Modell in Form von Steckbriefen dokumentiert. Abbildung 6-8 stellt beispielhaft für den Polder Stapel einen Auszug aus dem betreffenden Steckbrief dar. Eingezeichnet sind für den Ist-Zustand sowie eine zu betrachtende Variante (steuerbares Ein- und Auslaufbauwerk nahe der NATO-Brücke) die Fließstränge des Modells sowie die relevanten Modellelemente.

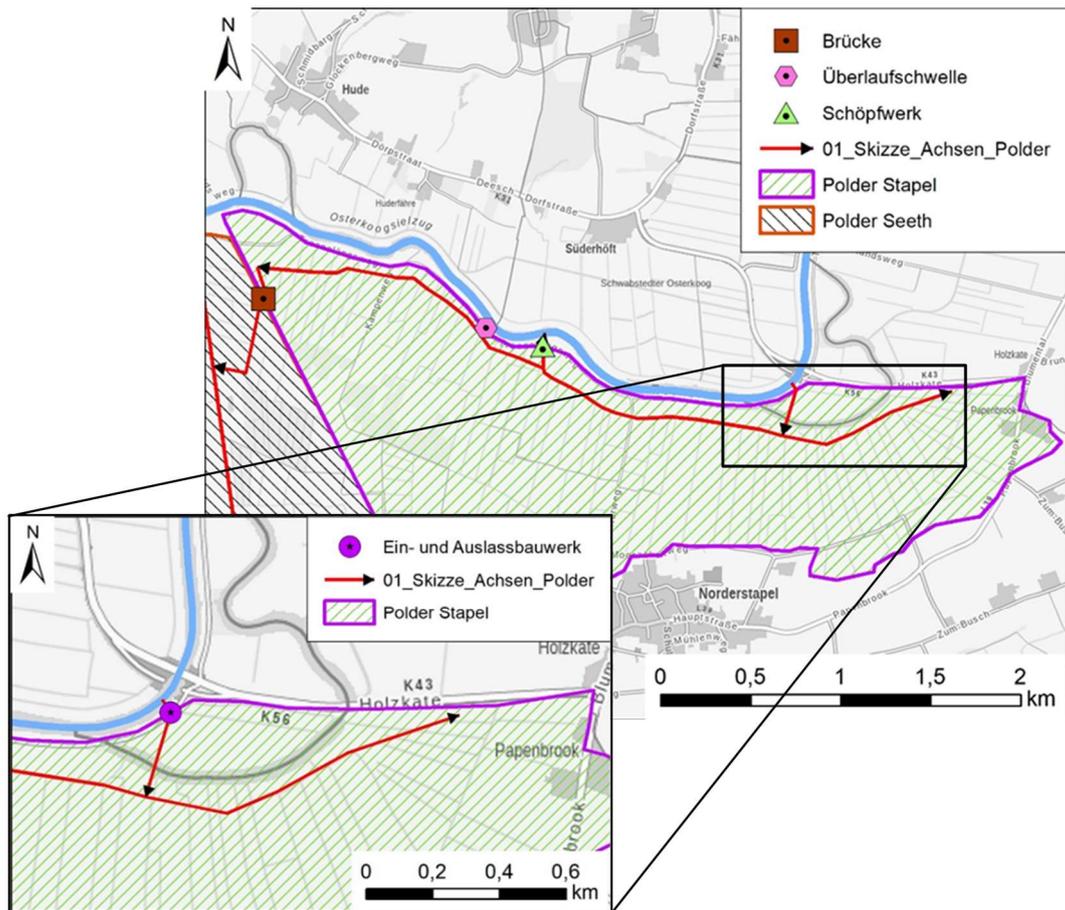


Abbildung 6-8: Beispiel für die Abbildung eines Treene-Polders im 1D-HN-Modell (hier Polder Stapel) im Ist-Zustand (großes Bild) sowie in einer Modellvariante (kleiner Ausschnitt)

Für die geplanten Szenarienuntersuchungen werden die Maßnahmen an der Treene separat und in Kombinationen modelliert, um die jeweiligen Wirkungen quantifizieren zu können. Dies geschieht für real abgelaufene Hochwasser (Hochwasser 2012, 2014, 2018 und 2020 oder 2022) sowie für unterschiedlich extreme hydrologische Szenarien (Hochwasser einer definierten Jährlichkeit). Damit sind Rückschlüsse der Maßnahmenwirksamkeit in Abhängigkeit der Charakteristik des Hochwassers (Scheitelabfluss, Fülle, Situation in der Eider) möglich. Der dritte Freiheitsgrad bei der Szenarien-Wahl stellt die Steuerung der Bauwerke bzw. das Zusammenspiel von Eider-Sperrwerk und den Anlagen Nordfeld und Friedrichstadt dar. Auch für diese sind Varianten zu definieren und mit den Maßnahmen an der Treene sowie dem jeweiligen hydrologischen Szenario zu kombinieren. Tabelle 6-1 fasst die geplanten Varianten der Szenarienuntersuchungen zusammen.

Tabelle 6-1: Vereinfachte Übersicht der geplanten Szenarienuntersuchungen zur Optimierung des Hochwasserschutzes

Hydrologisches Szenario	HQ ₂₀₀	HQ ₁₀₀	HQ ₁₀	HW ₂₀₁₂	HW ₂₀₁₄	HW ₂₀₁₈	HW ₂₀₂₂
Varianten der Anlagensteuerung	1 - 5	1 - 5	1 - 5	1	1	1	1
Ist-Zustand	Durch die geplanten Kombinationen von hydrologischem Szenario / Ereignis, Maßnahmen in / an der Treene und Variante der Anlagensteuerung ergeben sich derzeit ca. 70 Berechnungsvarianten						
bestehende Treene-Polder (Kombinationen)							
Zusätzliche + modifizierte Treene-Polder							
Variante Deichhöhe							
Variante Sohlhöhen							

6.5 Operationelle Optimierung der Wasserbewirtschaftung und des Hochwassermanagements

Ein abgestimmtes Zusammenspiel der baulichen Anlagen an der Eider und Treene (in erster Linie Eider-Sperrwerk sowie die Anlagen Friedrichstadt und Nordfeld, siehe Abschnitt 2.3.5 Zusammenwirken der baulichen Anlagen) ist elementar, um kritische hydrologische Zustände im Eider-Treene-System zu vermeiden bzw. soweit möglich abzumildern. Um dieses Zusammenspiel zukünftig noch weitergehend zu unterstützen und auch unter sich ändernden klimatischen Bedingungen möglichst optimiert zu betreiben, kann ein operationelles Vorhersagesystem von großem Nutzen sein. Durch die strukturierte Zusammenführung einer Vielzahl an Echtzeitdaten und Kombination dieser Daten mit Wasserhaushalts- und hydrodynamischen Modellen lässt sich die Wasserstandsentwicklung für ausgewählte Pegel sowie der Einfluss der Bauwerkssteuerung für unterschiedliche Steuerstrategien fundiert prognostizieren. Kritische hydrologische Zustände können damit frühzeitig detektiert und bewertet werden und auf dieser Grundlage kann der vorausschauende Betrieb der maßgeblichen Anlagen optimiert erfolgen. Abbildung 6-9 zeigt den schematischen Aufbau eines operationell einsetzbaren Vorhersagesystems, wie es sich für eine Mehrzahl an Bundeswasserstraßen bereits in Betrieb befindet. Das Vorhersagesystem integriert die Vielzahl an unterschiedlichen Daten und Datenformaten und macht sie den Vorhersagemodellen zugänglich. Die Daten wie auch die Modellergebnisse können über eine Nutzeroberfläche visualisiert und letztlich in Vorhersageprodukte überführt werden.

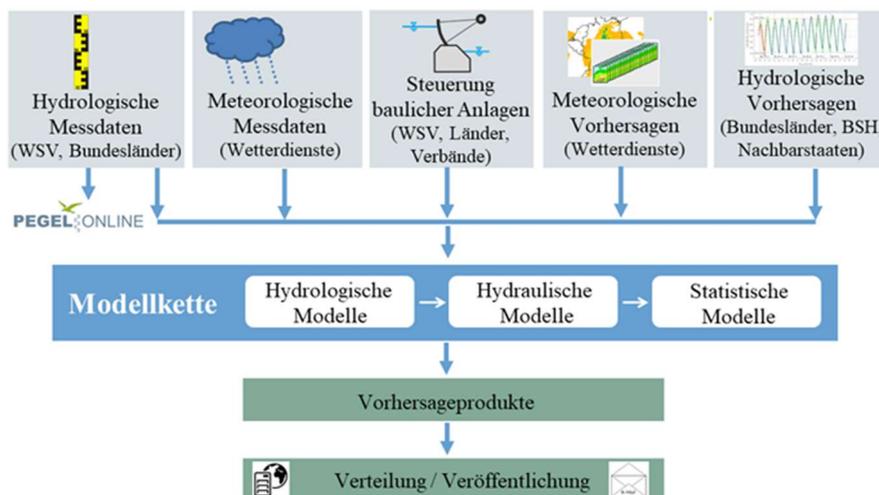


Abbildung 6-9: Schematische Darstellung des Zusammenspiels von Daten und Modellen innerhalb eines Vorhersagesystems für die Wasserstraßen

In der aktuellen Phase des Projekts „Zukunft Eider“ liegt der Fokus auf dem Aufbau der Modellkette, also der Erstellung der hydrologischen (WHM), hydrodynamischen (1D-HN-Modell) und statistischen Modelle. Parallel werden bereits die Schnittstellen der Modelle zu den Daten sowie der Modelle untereinander aufgebaut.

In der kommenden Projektphase wird es darum gehen, das Vorhersagesystem anwendungsreif aufzubauen, d.h. insbesondere die Datenflüsse zu organisieren und die Modellläufe zu automatisieren. Auch Inhalt und Gestalt der Nutzeroberflächen sind dann festzulegen, genauso wie die (verschiedenen) Vorhersageprodukte.

Als eine zentrale Herausforderung zeichnet sich eine automatisierte Bereitstellung der Daten zur aktuellen Bauwerkssteuerung (insbesondere des Eider-Sperrwerks) nahe Echtzeit ab. Hier sind technisch wie auch organisatorische Strukturen zu schaffen, um diese essentielle Information dem Vorhersagebetrieb kontinuierlich zugänglich zu machen. Erfahrungen und technische Entwicklung aus den Projekten am Nord-Ostsee-Kanal können dabei genutzt werden, sind jedoch auf die lokalen Spezifika anzupassen.

Darüber hinaus gilt es im weiteren Projektverlauf, ein Betriebs- und Pflegekonzept für das spätere Vorhersagesystem in Zusammenarbeit mit allen beteiligten Institutionen von Bund und Land SH zu erarbeiten.

7. Belange des Naturschutzes und der Ökologie

Im Rahmen des Projektes „Zukunft Eider“ soll abgeschätzt werden, wie sich die erarbeiteten Optimierungsvorschläge auf die Natur und Umwelt auswirken. Wenn ein konkreter Optimierungsvorschlag (5.3 Identifizierung von Optimierungspotentialen) entwickelt worden ist, werden seine Auswirkungen auf die Natur und Umwelt abgeschätzt. Im Nachfolgenden wird dargelegt, welche naturschutzfachlichen Planungen im Untersuchungsgebiet vorliegen.

7.1 Schutzgebiete und Managementpläne

Viele Flächen im Einzugsgebiet der Eider sind als Schutzgebiete ausgewiesen. Die Außeneider ist Teil des Nationalparks Wattenmeer. Die Außeneider und Tideeider (innerhalb des Eiderdammes) sind als EU-Vogelschutzgebiet und als Flora-Fauna-Habitat (FFH)-Gebiet ausgewiesen.

Im FFH-Gebiet „Untereider“ wird vor allem der Lebensraumtyp Ästuar (Code 1130) geschützt. Ackermann (2016) beschreibt Gefährdungen und Maßnahmenziele dieses Lebensraumtyps. Die Tideeider ist gefährdet durch anthropogene Veränderung der hydrologischen Verhältnisse. Ziel soll sein, Strukturen und Funktionen zu verbessern, wie beispielsweise natürliche Überschwemmungsverhältnisse und natürlicher Tideeinfluss. Folgende Einzelmaßnahmen werden vorgeschlagen (Ackermann 2016):

- Einstellung oder Reduzierung der Gewässerunterhaltung (Räumung außerhalb der Laichzeiten, nicht in den Sommermonaten)
- Rückbau von Uferverbauungen, Renaturierung Seitengewässer
- Wiederherstellung der Durchgängigkeit
- Schaffung von Flachwasserzonen und tidebeeinflussten Biotopen
- Deichöffnung oder -rückbau, z.B. Öffnung der Sommerdeiche

Auf Grundlage der Schutzgebietsvorordnungen wurden Managementpläne erstellt, um Maßnahmen durchzuführen, welche den ökologischen Zustand der Flächen verbessern. Es wurden Managementpläne für das Fauna-Flora-Habitat-Gebiet DE-1719-391 „Untereider“ und das Europäische Vogelschutzgebiet DE-0916-491 „Ramsar-Gebiet Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und angrenzende Küstengebiete“ für folgende Teilbereiche aufgestellt:

- Untereider von Nordfeld bis Tönning (Kaiser 2019)
- Grüne Insel mit Eiderwatt (Kaiser 2017)

Gemäß Kaiser (2019) haben die als Ästuar kartierten Flächen überwiegend einen ungünstigen Erhaltungszustand, ebenso die Wattflächen und die Salzwiesen.

Die Tideeider ist ein Übergangsgewässer (Meerwasser zu Süßwasser) und gilt als wichtige Transitstrecke der Wanderfischarten auf ihrem Weg zu den Laichplätzen. Die Treene ist ein wichtiges Laich- und Aufwuchsgebiet für die FFH-Arten Meer- und Flussneunauge und Rapfen. Finte und Rapfen haben einen ungünstigen Erhaltungszustand. In der Tideeider werden keine adulten Tiere aufgefunden. Vermutlich liegt das an stark schwankenden Salzgehalten, welche durch die Steuerung des Eider-Sperrwerkes entstehen können. Schulze und Scholle (2016, S. 52) schlagen vor, die Durchgängigkeit am Eider-Sperrwerk und an der Schleuse Nordfeld zu verbessern, um die Fischpopulation zu fördern. Kaiser (2019) stellt fest, dass der Bestand an Röhrichtbrüter gut ist, der an Wiesen- und Wasservögel ist stark rückläufig. Grund hierfür sei, dass die Niederterrasse während der Brutzeit überflutet wird. Folgende Entwicklungsmaßnahmen werden u.a. vorgeschlagen (Kaiser 2019, S. 29–32):

- Durchführung von Biotop-gestaltenden Maßnahmen (Abschrägung Grabenkanten, Anlage von Blänken, Poldern, Flach- und Kleingewässern), um Strukturvielfalt zu schaffen.
- Prüfung eines naturverträglicheren Betriebes von großen Fahrgastschiffen
- Umrüsten der Schöpfwerke mit Fischschutzmaßnahmen
- Betrieb Eider-Sperrwerk:
 - natürliche Wasserstandsschwankungen fördern
 - außerhalb der Brutzeit Vorlandsflächen überstauen, um Bodensalzgehalte für Salzwiesenvegetation zu erhöhen.
 - während der Brutzeit (01.03. bis 15.07) Höchstwasserstände vermeiden.

Die Tideeider inklusive Katinger Watt ist im Biotopverbundsystem von Schleswig-Holstein als Schwerpunktbereich eingestuft. Treene und Binneneider gelten als Hauptverbundachse. Darüber hinaus sind einige Flächen als Naturschutzgebiete geschützt (Grüne Insel mit Eiderwatt, Dithmarscher Eidervorland mit Watt, Oldensworter Vorland).

Die Tideeider ist bis zur Brackwassergrenze Teil des Trilateralen Wattenmeer-Kooperationsgebietes (Wattenmeerplan 2010 2010), basierend auf einer gemeinsamen Erklärung der Länder Dänemark, Deutschland und Niederlande. Der Wattenmeerplan 2010 sieht u.a. für den Tidebereich vor, die natürliche Dynamik zu erhalten. Die ungestörten Watten- und Sublitoralfächen sollen vergrößert werden. Die Ästuare sollen erhalten und, wo es möglich ist, wiederhergestellt werden. Der natürliche Zustand der Flussufer soll erhalten und wiederhergestellt werden. Ebenso soll die Funktion als Wanderroute und Brutgebiete für Fische und Vögel erhalten und wiederhergestellt werden. Es sollen günstige Lebensbedingungen für gefährdete Fischarten geschaffen werden. Natürliche Laichhabitate sollen erhalten werden und die Durchgängigkeit zwischen Wattenmeer und Binnengewässer für wandernde Fische wiederhergestellt werden.

Im Priorisierungskonzept (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022) wird ein Planungsrahmen aufgezeigt, um die Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen wiederherzustellen. Für die Eider ist eine Maßnahme an der Wehr- und Schleusenanlage Nordfeld im Zeitraum 2040 bis 2045 vorgesehen.

7.2 Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und Bewirtschaftungsplanung

Ziel der WRRL (Europäisches Parlament und Rat der europäischen Union 2000) ist es, den guten Zustand aller Oberflächengewässer und des Grundwassers zu erreichen. Alle oberirdischen Gewässer sind so zu bewirtschaften, dass eine Verschlechterung vermieden wird und ein guter ökologischer Zustand - bzw. bei als künstlich oder erheblich verändert eingestuften oberirdischen Gewässern ein gutes ökologisches Potenzial – wie auch ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht wird. Die zentralen Instrumente zur Umsetzung der WRRL in der Praxis sind flussgebietsbezogene Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme, die gemeinsam von den zuständigen Behörden der Bundesländer einer Flussgebietseinheit und gemäß § 7 Abs. 4 WHG im Einvernehmen mit der WSV aufgestellt werden.

Die Eider ist Teil der internationalen Flussgebietseinheit (FGE) Eider. Für sie wurde der dritte Bewirtschaftungsplan 2022 bis 2027 (MELUND 2021a) mit Maßnahmenprogramm erarbeitet. Charakteristisch für die FGE Eider ist ein hoher Grünland- (45%) und Ackerflächenanteil (43%). Die Tideeider ist vom Sperrwerk kommend bis Tönning als Übergangsgewässer typisiert, stromaufwärts als Fluss oder Gewässer der Marschen. Tide- und Binneneider werden als erheblich verändert (heavily modified waterbody, HMWB) kategorisiert. Bei der Binneneider werden als ausschlaggebende Gründe Landentwässerung, städtische Entwicklung und andere Nutzungen benannt, bei der Tideeider zusätzlich der Hochwasserschutz. Die FGE Eider ist mit diffusem Eintrag von Nährstoffen signifikant belastet. Haupteintragspfade sind bei Stickstoff und Phosphor Einträge über Dränagen und aus dem Grundwasser. Als signifikante hydromorphologische Belastung werden die morphologischen Veränderungen sowie in der Binneneider die Belastung durch Querbauwerke benannt. Die Tideeider wird zwischen Sperrwerk und Friedrichstadt als Vorranggewässer ausgewiesen, danach die Treene im weiteren Verlauf.

Im Rahmen des Maßnahmenprogrammes (MELUND 2021b) werden folgende Maßnahmen mit Synergieeffekten für den Hochwasserschutz genannt:

- Maßnahmen zum natürlichen Wasserrückhalt, z.B. durch Bereitstellung von Überflutungsräumen durch Rückverlegung von Deichen, Wiedervernässung von Feuchtgebieten

- Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstruktur von Sohle und Ufer mit oder ohne bauliche Änderung der Linienführung
- Maßnahmen zur Auenentwicklung und zur Verbesserung von Habitaten in der Aue, z.B. Maßnahmen zur Auenanbindung
- Maßnahmen zur Verringerung von Belastungen durch Landentwässerung durch Laufverlängerungen zur Verbesserung des natürlichen Wasserrückhaltes
- schonende Gewässerunterhaltung zur Förderung der natürlichen Wasserrückhaltung in der Fläche, mit denen das Wasserspeicherpotenzial der Böden und der Ökosysteme erhalten und verbessert werden soll.

Die Aufgabe des Wasserwirtschaftlichen Ausbaus gemäß dem Gesetz über den wasserwirtschaftlichen Ausbau an Bundeswasserstraßen zur Erreichung der Bewirtschaftungsziele der Wasserrahmenrichtlinie gelten damit auch für die Eider und sonstigen Bundeswasserstraßen. Danach sind bei verkehrlichen Maßnahmen für Unterhaltung und Ausbau die Ziele der WRRL zu beachten.

8. Termine, Gespräche, Bereisungen und Projektkommunikation

8.1 Projektkommunikation

8.1.1 Interne Projektkommunikation

Auf den Projektebenen werden regelmäßige Projektbesprechungen durchgeführt. Ein- bis zweimal im Jahr und nach Bedarf stimmen sich jeweils untereinander die Lenkungsgruppe, bestehend aus den leitenden Vertretern der Kooperationspartner, die Fachgruppe, zusammengesetzt aus den fachlichen Ansprechpartnern der Kooperationspartner und den beiden Oberbehörden BAW und BfG, die Kerngruppe und das Projektbüro ab. Die Kerngruppenmitglieder sind die maßgeblichen und ständigen fachlichen Umsetzer des Projektes. Sie stellen sich aus den fachlichen Vertretern des LKN.SH, des LfU, der BAW und der BfG zusammen. Das Projektbüro agiert als stetiger Begleiter und Organisator der Besprechungen und des Projektes.

Die folgende Übersicht gibt einen Überblick über die durchgeführten Besprechungen dieser Projektgruppen:

Administration, Lenkungsgruppe:

- ab Januar 2018: Aufstellen der Positionspapiere und der Kooperationsvereinbarung
- 22.02.2018: 1. Strategiegelgespräch, GDWS Standort Kiel
- 05.07.2018: 2. Strategiegelgespräch, DHSV Dithmarschen
- 30.10.2018: 3. Strategiegelgespräch, GDWS Standort Kiel
- 28.01.2019: Unterzeichnung des Kooperationsvertrages, GDWS Standort Kiel
- 18.06.2019: 4. Strategiegelgespräch, GDWS Standort Kiel
- 09.09.2020: 5. Strategiegelgespräch, GDWS Standort Kiel
- 22.06.2021: 6. Strategiegelgespräch, Webkonferenz
- 12.04.2022: 7. Strategiegelgespräch, Webkonferenz

Fachebene, Fachgruppe:

- 10.04.2018: 1. Fachgespräch, WSA Tönning
- 26.06.2018: 2. Fachgespräch, WSA Tönning
- 17.09.2018: 3. Fachgespräch, WSA Hamburg
- 07.11.2019: 4. Fachgespräch, WSA Tönning
- 21.04.2021: 5. Fachgespräch, Webkonferenz
- 25.06.2021: 1. Hydrologisches Fachgespräch, Webkonferenz
- 01.09.2021: 1. Morphologisches Fachgespräch, Webkonferenz

- 24.03.2022: 6. Fachgespräch, Webkonferenz

Fachebene, Kerngruppe:

- Mai bis Dezember 2018: Erstellen der Aufgabenstellung
- 11.06.2018: Abstimmungstreffen, BAW Hamburg
- 10.05.2019: Auftaktgespräch, Telefonkonferenz
- 06.06.2019: Auftakttreffen, BfG Koblenz
- monatlich: jour fixe der Kerngruppe per Telefon- bzw. Webkonferenz

8.1.2 Externe Projektkommunikation

In der ersten Projekthälfte wurde besonders innerhalb der Institutionen der Kooperations- und Projektpartner das Projekt vorgestellt.

Interne Projektvorstellungen der Kooperationspartner, eine Auswahl:

- 03.12.2019: Projektvorstellung beim DHSV Eiderstedt
- 11.12.2019: Fachaustausch „Küste“ zwischen BfG und BAW, BfG Koblenz
- 13.09.2021: Projektvorstellung bei den Bachelor-Studenten der Fachrichtung Bauingenieurwesen der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen am WSA Elbe-Nordsee
- 01.12.2021: Projektvorstellung im Gewässer- und Landschaftsverband Tideeider inkl. Arbeitsgruppensitzung FGE Eider
- 28.04.2022: Verbandssitzung des GuLV Treene
- 06.12.2022: Beiratssitzung Integriertes Küstenschutzmanagement
- 09.12.2022: Jahresdienstbesprechung im Geschäftsbereich der Abteilung Wasserwirtschaft, Boden- und Küstenschutz des MEKUN

Öffentlich wurde das Projekt z.B. über die Presse und das Internet bekannt gegeben.

Presse und Internet:

- 28.01.2019: Übertragung der Schließung des Kooperationsvertrages auf sat.1 SH und NDR SH und Veröffentlichung der Pressemitteilung
- 12.08.2019: Informationsschreiben an die Kreise NF, Dithmarschen, Rendsburg-Eckernförde und Schleswig-Flensburg
- ab August 2019: Projektinternetseite auf dem Portal Nordseeküste der WSV
- Mitteilungen in den örtlichen Zeitungen im Zuge der Vermessungsarbeiten des LKN.SH an der Treene im Juli 2019 und den Strömungsmessungen der BAW im September 2020
- 12.03.2022: Sendungsbeitrag „Zaun-Gespräche“ des NDR SH
- ab Februar 2022: Verfügbarkeit der BAW-Berichte auf dem Portal HENRY der BAW

8.2 Bereisungen

Im Zuge des Modellaufbaus wurden Ortseinsichten für die Fachebene des Projektes durchgeführt:

- 24.09.2019: Bereisung der Eider durch die BAW und das WSA Elbe-Nordsee per Schiff
- 06./07.11.2019: Bereisung des Eider-EZGs und der Anlagen der Eider durch die Fachgruppe
- 28.06 bis 29.06.2022: Bereisung der Treene und deren Einzugsgebiet durch die Fachgruppe
- 15.09.2022: Bereisung des Meggerkooges / Alte Sorge durch Vertreter der BfG, des Eider-Treene-Verbandes, des MEKUN und des WSA Elbe-Nordsee

8.3 Messkampagnen

Für die Verbesserung der Datenlage an der Eider und damit zur Kalibrierung und Validierung des Modellsystems wurden mehrere Messkampagnen notwendig:

- Einwöchige Strömungsmesskampagne am Eider-Sperrwerk: Testlauf im Juni 2020 und Hauptmessung im September 2020 der BAW
- Vierwöchige Qualitätsmessungen in der Außen- und Tideeider im September 2020 der BAW
- Einwöchige Sedimentprobenahme von ca. 150 Bodenproben im August 2021 der BAW
- Einwöchige Schwebstoffmessungen an zwei Positionen in den Anströmbereichen des Eider-Sperrwerkes im Januar 2022 der BAW
- Wasserprobenentnahmen an den Pegeln Tönning und Nordfeld Unterwasser am 30.11. und 01.12.2022 des WSA Elbe-Nordsee
- Einjährige Wasserqualitätsmessungen an vier Pegelstationen in der Außen- und Tideeider ab Dezember 2022 des WSA Elbe-Nordsee

9. Produkte

9.1 BAW

- Bericht Dokumentation Datengrundlage (01/2020) Arbeitspaket 3.2.0, Pos.1
- Masterarbeit „Ermittlung der Anforderungen des Naturschutzes und der Ökologie in Bezug auf Berechnungsparameter der Modellierung eines Tideästuars am Beispiel der Tide- und Außeneider“, Lara Mordhorst (10/2020)
- Bericht Ist-Zustand der Tideeider (03/2021), Arbeitspaket 3.2.1
- Bericht zur Messkampagne 09/2020, Strömung, Trübung, Leitfähigkeit (05/2021), Arbeitspaket 3.2.0, Pos.1, zusätzliche Arbeiten
- Bericht zur Messkampagne 06/2021 Sedimentprobennahme (07/2022), Arbeitspaket 3.2.0, Pos.1, zusätzliche Arbeiten
- Bericht zur Messkampagne 01/2022, Schwebstoffe, Kalibrierung (IMP 08/2022), Arbeitspaket 3.2.0, Pos.1, zusätzliche Arbeiten
- Validierungsdokument 3D-HN-Modell der Außen- und Tideeider (03/2022), Arbeitspaket 3.2.0, Pos.2
- Bericht morphologische Veränderung der Außen- und Tideeider, Vorarbeit zu Arbeitspaket 3.3.2
- Folien zum Vortrag vom 11.09.2020 Belange des Naturschutzes, Arbeitspaket 5, zusätzliche Arbeiten

9.2 BfG

- Modell und Dokumentation. Weiterentwicklung des Wasserhaushaltsmodells für den Nord-Ostsee-Kanal unter Verwendung des Modellframeworks HydPy. Projektbericht und Ergänzungsbericht von Björnsen Beratende Ingenieure im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Mai 2021
- Modelle und Dokumentation. Wasserwirtschaftliche Modellierung von drei Teileinzugsgebieten im tidebeeinflussten Tiefland der Eider. Deltares im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, März 2022
 - A) Wasserhaushaltsmodellierung Teileinzugsgebiet Sorge / Sorgbrück
 - B) Gekoppelte Wasserhaushalts- und Gewässernetzmodellierung im Teileinzugsgebiet Alte Sorge / Steinschleuse
 - C) Gekoppelte Wasserhaushalts- und Gewässernetzmodellierung im Teileinzugsgebiet Norderbootfahrt / Tönning
- Doeckel, Carola: Modellbasierte Sensitivitätsanalysen zum Wasserhaushalt und zur Wasserbewirtschaftung im Eider-Einzugsgebiet am Beispiel der Norderbootfahrt.

Bachelorarbeit. Geographisches Institut, Rheinische Friedrichs-Wilhelms-Universität Bonn, März 2022

- Reichartz, Philipp: „Untersuchungen zum Gebietswasserhaushalt der Norderbootfahrt – ein kleines Einzugsgebiet in der Marschlandschaft von Schleswig-Holstein“. Aufbau eines excel-basierten Prototyps auf der Grundlage von WALRUS.
- Rohmodell und Zwischenbericht. Wasserhaushaltsmodellierung. Björnsen Beratende Ingenieure im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Dezember 2022
- Protokoll der Treene-Bereisung am 28. / 29. Juni 2022, Beitrag zu Arbeitspaket 4.2 und 4.3

10. Zusammenfassung

In dem Projekt „Zukunft Eider“, einer Kooperation aus der WSV, dem Land SH und den drei zuständigen Deich- und Hauptsielverbänden, sollen Antworten auf die Kernfrage „Wie kann die Entwässerung des Eider-Einzugsgebietes erhalten bzw. optimiert und parallel der Versandung der Eider entgegengewirkt sowie die Schiffbarkeit erhalten werden?“ gefunden werden.

Hierfür wurden die BfG und die BAW beauftragt bestimmte Fragestellungen zu untersuchen. Dies soll mit einem System, bestehend aus drei Hauptmodellen, erfolgen. Die BAW führt eine wasserbauliche Systemanalyse der Außen- und Tideeider inkl. der Betrachtung der Morphologie mittels eines dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells, das mit einem Sedimenttransportmodell gekoppelt wird, durch. Die BfG bearbeitet die wasserwirtschaftlichen Fragestellungen im Eider-Treene-Sorge-System mit einem Wasserhaushaltsmodell und einem eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modell. Anschließend erstellt die BfG aus den beiden Modellen ein Vorhersagesystem für den operationellen Betrieb. Mögliche Folgen des Klimawandels werden in beiden Systemanalysen mit einbezogen und untersucht.

Bevor die Modelle aufgestellt werden können, mussten umfassende Datenrecherchen und –auswertungen durch die BfG und die BAW erfolgen. Die Datenlage im Eider-Einzugsgebiet ist spärlich und so mussten zusätzliche hydrologische und morphologische Messdaten in mehreren Messkampagnen von allen Projektpartnern, besonders von dem LKN.SH und von der BAW mit Unterstützung des WSA Elbe-Nordsee, aufwendig erhoben werden. Diese Datenerhebungen und die anschließenden Auswertungen wurden in einigen Berichten der BAW niedergeschrieben und veröffentlicht. Auch das Verständnis des komplexen Gebietsystems musste in mehreren Vorstudien anhand von Teilgebieten durch die BfG erarbeitet werden. Hierbei erhärtete sich immer mehr die Aussage, dass für dieses Untersuchungsgebiet keine Standardsoftwarelösungen herangezogen werden können, sondern spezifische Prozessansätze gefunden, aufgestellt und getestet werden müssen. Hierbei wird die BfG von externen Auftragnehmern unterstützt. Auch verschiedene studentische Arbeiten werden im Zuge der Projektuntersuchungen bei der BAW und BfG ausgeführt.

Währenddessen herrscht stets ein reger Informations- und Fachaustausch innerhalb der Kooperations- und Projektpartner, u.a. mittels regelmäßiger Besprechungen in fachspezifischen kleineren und größeren Gruppen. Auch die externe Kommunikation wird z.B. in Form von Projektvorstellungen, besonders durch das Projektbüro, in verschiedenen Interessenskreisen gepflegt. Die Öffentlichkeit wird zudem über verschiedene Medien durch die Presse- und Öffentlichkeitsarbeit im Projekt informiert.

Die Modelle werden voraussichtlich Mitte 2023 abschließend aufgestellt, kalibriert und validiert sein. Anschließend werden verschiedene Szenarien möglicher Optimierungsvarianten gerechnet. Aus diesen werden Maßnahmen entwickelt, um der Versandung der Tideeider entgegenzuwirken und die Entwässerung im Eider-Einzugsgebiet in Zukunft sicherstellen zu können.

Literaturverzeichnis

Ackermann, Werner (2016): LRT 1130 – Ästuarien. Maßnahmenkonzept. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz. Bundesamt für Naturschutz.

Adler, Matthias, Nicodemus, Uwe und Schumann, Lars (2018): BfG-1965: Bericht – Instandsetzung des Uferschutzes an der Tideeider: Tidemessungen zur Kalibrierung eines hydrodynamisch-numerischen Modells“.

Bednarczyk, Klaus (2003): Betrieb der Sielanlage Nordfeld. - allgemeine Beschreibung. Wasser- und Schifffahrtsamt Tönning (Az. 2.21.7/0).

Brauer, C.C., Teuling, A.J., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., 2014. The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater. *Geoscientific Model Development*, 7: 2313-2332. DOI:10.5194/gmd-7-2313-2014.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2021): Jahresbericht 2020/2021, S. 33 ff. https://www.bafg.de/DE/05_Wissen/04_Pub/01_Jahresberichte/Bfg-Jahresbericht2021.pdf?__blob=publicationFile

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022): Erhaltung und Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen. Priorisierungskonzept und Maßnahmenpriorisierung des BMDV Aktualisierung 2021. Hg. v. Bundesministerium für Digitales und Verkehr.

Casulli, Vincenzo; Walters, Roy A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32 (3), S. 331–348.

Europäisches Parlament und Rat der europäischen Union (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. WRRL, vom 13.09.2013.

Frielingsdorf, Barbara, Klein, Bastian, Meißner, Dennis (2022): BfG-2026 – Bericht: Entwicklung längerfristiger hydrologischer Vorhersageprodukte im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsprojekte Seamless Prediction II und IMPREX.

Fülscher, J. (1898): *Der Bau des Kaiser-Wilhelm-Kanals*, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1898.

Gönnert, Gabriele (1995): *Mäandrierung und Morphodynamik im Eider Ästuar*. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 1995. Inst. für Geographie, Berlin.

Hagemann, N. (1984): Extremwerte der Windgeschwindigkeit in Norddeutschland, Meteorol. Rdsch. Heft 3, 88-90.

Hagen, Robert; Freund, Janina; Plüß, Andreas; Ihde, Romina (2020): Validierungsdokument EasyGSH-DB Nordseemodell. Teil. UnTRIM2 – SediMorph – UnK. 2019. Online verfügbar unter https://www.doi.org/10.18451/k2_easygsh_1, zuletzt geprüft am 11/2020.

Hirschhäuser, Th.; Mewis, P.; Zanke, U. (1998): Determination of the Initial Distribution of Particle Size in Morphodynamic Modelling in Tidal Areas. Berlin/Cottbus.

DIN 4049-3: 1994-10: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie.

Kaiser, Hans-Joachim (2017): Managementplan für das Fauna-Flora-Habitat-Gebiet DE-1719-391 „Untereider“ und das Europäische Vogelschutzgebiet DE-0916-491 „Ramsar-Gebiet Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und angrenzende Küstengebiete“. jeweils Teilgebiet Grüne Insel mit Eiderwatt. Ministerium für Energiewende Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Kiel.

Kaiser, Hans-Joachim (2019): Managementplan für das Fauna-Flora-Habitat-Gebiet DE-1719-391 „Untereider“ und das Europäische Vogelschutzgebiet DE-0916-491 „Ramsar-Gebiet Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und angrenzende Küstengebiete“. jeweils Teilgebiet "Untereider von Nordfeld bis Tönning". Hg. v. MELUND. Ministerium für Energiewende Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Kiel.

Hydrotec (2022): Aufbau eines anwendungsreifen SOBEK-Modells der Ober- und Mittelweser, Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Aachen, 2022.

Kösters, Frank; Winter, Christian (2014): Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. In: Geo-Marine Letters (34), S. 21–36.

Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (2017): Dienstanweisung für den Betrieb und die Unterhaltung der Schiffahrts-, Entwässerungs- und Spülschleuse Friedrichstadt.

Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (2019): Eider Wach- und Warndienst. Fundstelle: LKN.SH 211.

LLUR – Landesamt Für Landwirtschaft, Umwelt Und Ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2019): Die Böden Schleswig-Holsteins mit Erläuterungen zur Bodenübersichtskarte 1:250.000. September 2019.

Malcherek, Andreas; Piechotta, Friederike; Knoch, Denise (2002): Mathematical Module SediMorph Validation Document. Version 1.1. Hg. v. The Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW).

MELUND (2021a): Bewirtschaftungsplan. FGE Eider; 3. Bewirtschaftungszeitraum 2022 – 2027, 22.12.2021.

MELUND (Hg.) (2021b): Maßnahmenprogramm, FGE Eider, 3. Bewirtschaftungszeitraum 2022 – 2027. Unter Mitarbeit von Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein. Kiel.

Milbradt, Peter; Sievers, Julian (2019): Erstellung / Erweiterung des Funktionalen Bodenmodells für die Ästuarbereiche bzgl. Bathymetrie, Bagger- und Umlagerungsdaten sowie von Bauwerksinformationen. Sachstandsbericht August 2019. Hg. v. smile consult GmbH. Hannover.

Müller-Westermeier, G.; Kreis, A.; Dittmann, E.: Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland, Teil 1, Deutscher Wetterdienst, Offenbach 1999.

Müller-Westermeier, G.; Kreis, A.; Dittmann, E.: Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland, Teil 2, Deutscher Wetterdienst, Offenbach 2001.

Müller-Westermeier, G.; Kreis, A.; Dittmann, E.; Barfus, K.; Czeplak, G.; Riecke, W.: Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland, Teil 3, Deutscher Wetterdienst, Offenbach 2003.

Müller-Westermeier, G.; Walter, A. und Dittmann, E.: Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland, Teil 4, Deutscher Wetterdienst, Offenbach 2005.

Naturschutzbund Deutschland (NABU): Die Eider - Drama eines Flusses: <https://schleswig-holstein.nabu.de/imperia/md/nabu/images/regional/schleswig-holstein/einrichtungen/katingerwatt/eidergeschichte.pdf>, aufgerufen am 05.06.2023

Ricklefs, Klaus (1989): Zur Sedimentologie und Hydrographie des Eider-Ästuars. Kiel: Eigenverlag.

Schmidt, H. (1980): Zur Extrapolation empirischer Verteilungen der Windgeschwindigkeit für Standorte im Flachland und auf freier See, Meteorol. Rdsch. 33, 129-137, 1980.

Schulze, Sandra; Scholle, Jörg (2016): Fischbiologische Untersuchungen in der Tideeider in 2015. Bewertung der Vorkommen FFH-relevanter Fische und Rundmäuler und Bewertung des Wasserkörpers nach WRRL. Hg. v. BIOCONSULT.

Siegmann, Elke; Freund, Janina; Kösters, Frank (2021a): Zukunft Eider - Beschreibung Ist-Zustand der Tideeider. wasserbauliche Systemanalyse. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg (B3955.02.06.10011). Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108378>.

Siegmann, Elke; Freund, Janina; Kösters, Frank (2022): 3D hydrodynamisches numerisches Modell der Außen- und Tideeider. Validierungsdokument. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg.

Siegmann, Elke; Freund, Janina; Kösters, Frank (2023): Morphologische Veränderung der Außen- und Tideeider. Gis-gestützte Analyse auf Grundlage digitaler Höhenmodelle. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg.

Siegmann, Elke; Kösters, Frank (2020): „Zukunft Eider“ Datenrecherche, Datenbedarf. Wasserwirtschaftliche und wasserbauliche Systemstudie des Eider-Treene Systems. Hg. v. BAW. Hamburg.

Siegmann, Elke; Kösters, Frank (2021): Sedimentprobennahme Eider 08/2021. Messbericht. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg (B3955.02.06.10011). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.48437/02.2022.K.0601.0002>.

Siegmann, Elke; Maushake, Christian; Mordhorst, Lara; Jansch, Hanne (2021b): Messbericht und Auswertung der Messkampagne September 2020 an der Eider. Eider: Sperrwerkswirkung B3955.02.34.10001. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.48437/02.2022.K.0601.0001>.

Stelling & Duinmeijer (2003): „A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows“, International Journal for numerical Methods in Fluids, Volume 43, Issue 12, pages 1329 – 1354 (DOI: 10.1002/flid.537), December 2003.

Tetzlaff, B., Keller, L., Kuhr, P., Kreins, P., Kunkel, R., Wendland, F. (2017): Nährstoffeinträge ins Grundwasser und die Oberflächengewässer Schleswig-Holsteins unter Anwendung der Modellkombination RAUMIS-GROWA-WEKU-MEPHos, Endbericht zum Forschungsprojekt, 230 S..

Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord (1977): Betriebsordnung für das Eider-Sperrwerk 1977.

Wattenmeerplan 2010. Elfte Trilaterale Regierungskonferenz zum Schutz des Wattenmeeres (2010). Westerland/Sylt.

Wieland, Peter (1999): Entwicklungen in der Eider nach ihrer mündungsnahen Abdämmung. Hamburg: Schifffahrts-Verl. "Hansa" (Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 46).

Wijngaard, R.R., van der Perk, M., van der Grift, B., de Nijs, T.C.M., Bierkens, M.F.P., 2017. The Impact of Climate Change on Metal Transport in a Lowland Catchment. Water Air Soil Pollut, 228(107): 1-21. DOI:10.1007/s11270-017-3261-4.